

원자력발전소 중대사고시 수소 제어 방법

진 영 호

한국원자력연구소

1. 서 론

원자력발전소(원전)에서 발생 가능성이 거의 없지만, 그래도 핵연료의 용융을 가져오는 중대사고가 발생하면 다량의 수소가 발생한다. 즉, 노심이 노출됨에 따라, 노심은 과열되고 핵연료 피복재인 지르코늄이 수증기와 반응을 하여 산화되면서 수소를 생성하게 된다. 원자로내에서 생성된 수소는 발생한 수소는, 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS)이 건전하다면 RCS내에 축적되고, RCS 에 누설 경로가 있다면 격납건물로 방출되어 격납건물에 축적된다. 격납건물 내의 수소농도가 4~6%에 도달하면, 수소는 점화되어 격납건물의 압력 및 온도 스파이크를 유발시킬 수도 있다. 만일 충분한 수소가 격납건물 내에 축적된다면, 수소가 연소될 때 격납건물 설계 압력을 초과하는 압력 스파이크를 일으켜 격납건물의 건전성을 상실할 수 있다. 비록 격납건물의 건전성이 전면적 수소연소로 위협받지 않는다고 하더라도, 전면적 수소연소가 발생할 수 있다는 사실 때문에 수소 농도를 잘 제어하여야 한다. 본 논문에서는 발전소 상태에 따라 수소점화기, 수소재결합기 등 격납건물내에 있는 설비들을 적절히 사용하여 격납건물내의 수소 농도를 제어하는 방법을 제시하였다.

2. 수소 제어 관련 설비

한국 표준형 원자력발전소에는 수소 제어 설비로 수소재결합기와 수소점화기가 설치되어 있다. 수소재결합기는 설계기준사고시, 즉 냉각재상실사고시 발생할 수 있는 수소를 제거하기 위하여 설치되어 있으며, 발전소마다 설치되어 있는 것이 아니라 부지당 1대가 설치되어 있다. 수소재결합기는 설계기준사고를 대비한 설비이기 때문에 격납건물내 수소 농도가 5% 이하일 때 사용하도록 설계되어 있다. 이에 반하여 수소점화기는 중대사고를 대비한 설비로서 수소농도가 5% 이상이 될 때 수소를 제거하기 위하여 격납건물내 곳곳에 설치되어 있다. 수소 제어 설비는 아니지만 격납건물내에는 모터와 전동식 밸브가 있어 이들을 작동시킬 때 전기 스파이크가 발생하는 것을 점화원으로 사용할 수가 있다.

3. 수소 제어 방법

격납건물내 수소는 격납건물내 수소 연소(수소점화기 사용 또는 인위적인 수소 연

소) 또는 수소재결합기 사용으로 감소될 수 있다. 이상의 두 가지 방안 외에 격납건물 내에서 수소 연소가 일어나는 것을 예방하기 위하여 격납건물 대기를 불활성 상태로 만들고 점화원을 격리하는 방안도 있다. 격납건물 수소 농도를 감소시키기 위하여 격납건물 배기를 실시할 수 있으나, 본 논문에서는 격납건물 수소 제어를 위한 격납건물 배기는 고려하지 않았다.

3.1 수소점화기 사용

격납건물내 수소 농도를 감소시키는 가장 좋은 방안은 수소점화기를 사용하는 것이다. 수소점화기는 중대사고시 격납건물내 국부 수소 농도를 제어하기 위한 설비로 RCS 에서 격납건물로 수소가 방출될 수 있는 곳에 설치되어 있으며, 100 % 지르카로이 산화 반응이 일어나더라도 격납건물 내의 전체 수소 농도를 10 % 이하로 유지할 수 있도록 설계되어 있다[1,2]. 수소점화기를 사용하면 수소 농도가 4%를 초과할 때부터 수소가 연소되기 때문에 격납건물 내에 수소가 집적되지 않는다. 또한 수소 농도가 낮을 때 수소 연소가 일어나므로 압력 및 온도 스파이크도 낮다.

3.2 인위적인 수소 연소

수소점화기 사용외에 격납건물내 수소 농도를 감소시키는 빠른 방안은 인위적으로 수소를 연소시키는 것이다. 이 방법은 인위적으로 수소 연소를 일으키는 데, 이 때 격납건물 압력과 온도는 스파이크를 일으킨다 (약 15초정도 지속). 그러나 일단 압력과 온도의 스파이크가 끝나면 추가적인 지르코늄-물 반응이 일어나지 않는 한, 수소 연소에 의한 격납건물의 건전성에의 단기적 위협은 없게된다. 이 연소는 격납건물내 기기와 계측기의 기능 상실을 야기하지는 않을 것으로 예상된다[3].

3.3 수소재결합기 사용

수소재결합기는 격납건물내 대기로부터 공기와 수소 혼합물을 추출하고, 혼합물에 열을 가하여 수소와 산소를 결합시켜 물로 만드는 것이다. 수소재결합기 계통은 설계기준인 LOCA시 수소농도를 4% 이하로 유지하도록 설계되어 있다[4]. 수소재결합기는 물의 방사화, 장기적인 지르코늄-물 반응, 그리고 급속(즉 아연과 알루미늄)의 부식에 의해 생기는 수소를 제거하도록 설계되어 있다. 이러한 과정에서 수소는 매우 느린 율로 생성되므로 수소재결합기도 매우 느린 율로 수소가 제거되도록 설계되었다 그러므로 격납건물내 수소농도가 6% 이상일 때 수소재결합기를 사용하면 격납건물내 수소는 매우 느리게 감소된다. 그러나 전면적 수소 연소나 격납건물 배기없이도 재결합기를 사용하여 격납건물내 수소 농도를 감소시킬 수 있다.

수소재결합기는 중대사고시 사용하도록 설계되어 있지 않다. 그러나 수소점화기를 사용할 수 없으며 인위적 수소 연소를 하지 않기로 결정했을 때, 수소재결합기는 격납건물내 수소농도를 감소시킬 수 있는 유일한 수단이다. 중대사고 동안에 수소재결합기 사

용에 따른 부정적인 영향들은 다음과 같다.

- 수소재결합기의 설계 제한치는 수소농도 4~6% 정도이다. 만일 수소재결합기를 설계 제한치 이상의 수소 농도에서 사용한다면, 수소재결합기는 발열반응인 수소·산소 반응에 의해서 과열될 것이다. 그러므로 중대사고시 예상되는 수소농도(10% 내외)에서 수소재결합기가 장기간 견딘다는 것을 기대할 수 없다.
- 수소재결합기가 격납건물 외부에 위치할 때 핵분열생성물은 수소재결합기 운전시 격납건물 외부로 순환되며, 이때 정상 누설 유로를 따라 수소재결합기로부터 누설될 수도 있다.
- 수소재결합기가 작동될 때 격납건물 내부에 에어로졸 농도가 높다면, 재결합기의 공기 유로는 에어로졸이 침착하여 매우 빨리 막힐 수도 있다.

3.4 수소연소 예방

격납건물내 수소 연소는 매우 높은 압력과 온도의 스파이크를 야기한다. 격납건물 내 상태에 따라 수소연소는 격납건물의 손상을 일으키거나 격납건물 내부에 위치한 기기와 계측기에 손상을 일으킬 수 있다. 그러므로 수소연소를 예방하기 위해서는 다음과 같은 조치가 요구된다. 첫째, 수소가 점화되는 것을 예방하기 위해서 “증기 불활성” 상태가 되도록 격납건물내 증기 농도를 증가시킨다. 격납건물은 58 psig 이하의 압력에서 장기간 견딜 수 있도록 설계되어 있으므로 격납건물 불활성화는 다른 회복조치가 수행되고 있는 중에는 매우 효과적인 수소 제어 방안이 된다. 수소연소를 예방할 수 있는 또 다른 조치는 격납건물내 모든 잠재적인 점화원들을 차단시키는 것이다. 점화원은 사용시 스파이크를 일으킬 수 있는 여러 종류의 전기 기기들이다(즉 모터, 모터작동 밸브, 릴레이 등). 이러한 점화원에 전력을 차단함으로써 격납건물내 수소연소의 가능성을 감소시킬 수 있다.

4. 수소 제어 방법 선정 절차

격납건물 내 수소 제어 방법은 상기에서 살펴본대로 수소점화기 작동, 인위적인 수소 연소, 수소재결합기 운전, 수소연소 예방, 그리고 조치 없음의 5가지가 있다. 5가지 수소 제어 방법들은 발전소 상태에 따라 사용할 수도 있고, 사용하지 못할 수도 있으므로 현재 발전소 상태를 파악한 후 가장 적절한 수소 제어 방법을 선정하여야 하며, 그 선정 절차는 다음과 같다.

1. 현재의 수소 농도가 어느 영역에 있는지 그림 1을 보고 판단한다. 그림 1에서 수소위협은 수소가 점화되면 격납건물의 건전성이 위협받는 것을 의미하며, 수소연소는 수소가 점화되어도 격납건물 건전성이 조금도 위협받지 않는 것을 의미한다. 향후 수소위협 및 향후 수소연소는 현재로는 수소 연소가 되지 않지만 앞으로 수증기가 응축되어 압력이 낮아지면 수소위협 또는 수소연소 영역으로 움직인다는

것을 의미한다.

2. 현재 수소 농도가 위치한 영역에 따라 적용할 수 있는 수소 제어 전략을 표2에서 확인한다.
3. 적용할 수 있는 수소 제어 전략의 긍정적 영향과 부정적 영향을 파악하고 평가한다.
4. 발전소 상태에 맞는 수소 제어 전략을 선정한다.

5. 결 론

원자력발전소(원전)에서 가상 사고인 중대사고가 발생하면 다량의 수소가 발생한다. 원자로내에서 생성된 수소는 격납건물로 방출되게 되며, 격납건물로 방출된 수소는 점화원이 있을 경우 연소를 일으킨다. 수소연소가 일어나면 그때의 발전소 상태에 따라 격납건물이 손상될 수도 있으므로, 발전소 상태에 따라 적합한 수소 제어 방법을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 수소제어 방법으로 **수소점화기 작동, 인위적인 수소 연소, 수소재결합기 운전, 수소연소 예방**, 그리고 **조치 없음**의 5가지를 제시하고, 발전소 상태(**수소위협, 수소연소, 향후 수소위협, 향후 수소연소, 수소 관련사항없음**)에 따라 적절한 수소 제어 방안을 선정하는 절차를 제시하였다.

참고문헌

1. 한국전력기술주식회사 업무처리전 교신번호 UES/KU-07836, “울진 3,4호기 수소점화기 계통 운전 및 점검절차서 입력자료 송부” 1998.5.1.
2. 한국전력기술주식회사 기술검토보고서 9-035-N463-004, “영광 5,6호기 수소점화기 계통 최적화설계”.
3. Thompson, R, T., et. al., “Large-Scale Hydrogen Combustion Experiments, Volume II, Data Plots,” EPRI Report NP-3878, Volume II., 1988
4. 한국전력공사, “울진원자력발전소 3,4호기 최종안전성분석보고서 6장”.

표1. 수소 영역에 따른 적용 가능한 수소 제어 전략

수소 영역 (그림 1 참조)	적용 가능 전략
향후 수소 위협	수소 재결합기 작동
	조치 없음
향후 수소 연소	수소점화기 작동
	수소 재결합기 작동
	조치 없음
수소 연소	수소점화기 작동
	인위적인 수소 연소
	수소 재결합기 작동
	수소연소 예방
	조치 없음
수소 관련사항 없음	수소 재결합기 작동
	조치 없음

표 2. 수소 제어 전략의 긍정적 영향과 부정적 영향

전략	긍정적 영향	부정적 영향
수소점화기 작동	○ 격납건물내 수소 농도 제어	○ 격납건물 압력 및 온도 상승
인위적인 수소 연소	○ 단기적으로 격납건물 수소농도 감소	○ 격납건물 압력 및 온도의 순간적 급상승
수소 재결합기 운전	○ 격납건물 저압력 유지 가능	○ 수소양 감소 속도 매우 완만 ○ 수소 재결합기 운전중 핵분열생성물 누설 가능성
수소연소 예방	○ 격납건물 내 수소 연소 안됨	○ 격납건물 고압력시 핵분열생성물 누설 증가 ○ 임시 방편이며, 다른 장기 방안이 요구됨
조치 없음	○ 다른 조치 수행에 인력과 자원 사용	○ 계속적인 수소 축적

그림 1 수소 농도에 따른 수소 영역 (습식 수소 농도 측정 방법)

