

기체방사성폐기물 처리계통 수소가스 농도 제한치 평가

성기방*, 백영희, 정은경, 권혁철

한국수력원자력(주)중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312 번길 70

*kind.sung@khnp.co.kr

1. 서론

원자력발전소에서는 냉각수 방사분해로 생성된 산소제거를 위해 수소를 사용하고 있으며, 계통 안전을 확보하기 위하여 수소와 산소의 농도를 감시하고 농도관리 기준을 설정하여 운영한다. 수소는 가연성 기체로서 공기중 산소와 2대1로 혼합되어 연소될 경우에 초기압력의 최대 10배 압력상승으로 계통의 안전에 영향을 미치며, 수소-산소 또는 산소-수소 혼합비율이 커지면 압력상승은 적어지고, 결국 연소한계치를 벗어나게 된다. 원전 기체방사성폐기물처리계통(GRS)을 통한 냉각재계통 배기 및 격납건물계통 사고분석시 공간내 수소는 4% 이내로 엄격히 관리한다. 수소-산소의 농도, 압력 조건별 최신 실험 결과를 바탕으로 원전의 기체방사성처리계통의 현재 수소농도 관리 방법과 수소 폭발로부터 안전하기 위한 수소농도 관리 제한치를 평가하였다.

2. 본론

2.1 기체방사성 폐기물처리계통 수소농도 관련규정

원전의 폭발성 기체에 관련하여 언급된 규정은 NUREG-1431(WH), NUREG-1432(CE)의 기술지침서와 NUREG-0800(SRP)에 근거한 최종안전성분석 보고서이다. 폭발성기체 규정부분의 핵심내용은 기체폐기물처리계통(GRS)의 수소와 산소 농도제한치가 안전범위내에서 유지됨을 확인할 감시프로그램이 있고, 수소폭발시 폭발충격을 견딜 수 있도록 계통설계기준이 충족하거나, 수소폭발 이전에 수소 또는 산소농도를 감시하고 낮출 수 있는지 여부이다.

2.1.1 원전 기술지침서(ITS)

수소농도 제한치 기술기준을 근거로 설정된 원전의 기술지침서의 폭발성 기체감시 계획서는 "GRS 내 산소농도 또는 수소농도가 체적비 4% 이내로 제한되어야 한다"라고 조건만 기술되어 있다. 즉, 설계기준이 폭발압력을 고려하여 설계되어 있지만 산소-수소 농도 제한치도 충족되도록 보수적으로 요구하고 있다.

2.1.2 GRS 수소농도 운영기준

PWR 기체방사성 처리계통의 기체감시조건 규정은 ANSI.55.4(PWR GRWPS I&C)이며, 수소기체농도는 지시만 해도 되며, 산소기체농도는 기록과 지시 및 고경보치가 설정되어야 한다. 최종안전성분석보고서(FSAR)의 GRS 계통에서 산소감시기는 중요한 산소농도일때 경보를 울린다.

2.2 기체방사성폐기물처리계통 설계압력 검토

수소감시가 필요 없어도 되는 계통설계운전압력은 운전압력의 20 배로 설계하여야 한다. GRS 운전압력이 2 psig 이므로 SRP 조건을 만족하기 위해서는 최소 40 psig를 충족하여야 한다. 또한 GRS 설계압력은 100 psig 이상이므로 설계기준을 충족한다. 수소-산소 폭발 감시 프로그램이 없어도 NUREG-1431 규정을 만족한다.

2.3 산소-수소 혼합물의 폭발특성 최신 실험결과

2.3.1 수소-산소 조성 비율

원전안전심사지침의 있는 수소폭발 하한치는 수소 4%이고, 수소폭발 상한치는 수소 96%이며, 이 제한치는 독일 연구소[1]에서 실시한 수소-산소 폭발실험 결과(Fig. 1)와 거의 일치한다.

2.3.2 수소-산소 혼합물의 폭발시 압력상승

원전안전심사지침에서는 기체압력상승을 고려한 설계기준으로 운전압력의 20배를 요구하며, 독일 연구소에서 실시한 수소-산소 폭발시 압력상승 최대치는 수소 66%, 산소 34% 정도에서 폭발전 압력의 10배 정도였다(Fig.2). 또한 수소와 산소 농도 제한값인 4~5% 부근에서 연소는 일어나지만 농도제한값 부근에서 폭발시 압력상승은 크지 않았다. 따라서 수소-산소 폭발실험의 결과에 의하면 안전심사지침에서 규정한 설계압력이 운전압력의 20배 요구 사항은 수소폭발시 압력상승이 폭발전 압력의 최대 10배 이내이기 때문에 충분히 보수적이다.

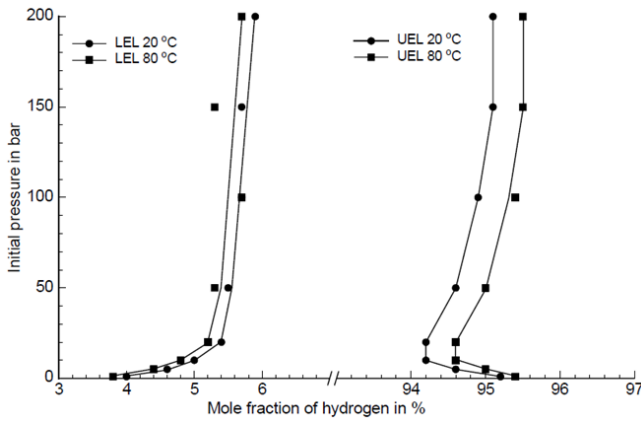


Fig. 1. Influence of the initial pressure on the explosion limits of H₂-O₂ mixtures at 80°C.

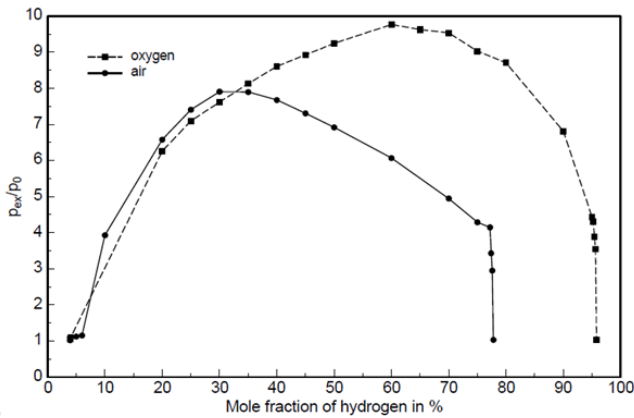


Fig. 2. Explosion Pressure of H₂-Air mixtures at 1bar and Room Temperature.

2.4 국내 원전별 폭발성 기체 감시계획서

국내원전에서 냉각재 화학체적 및 제어 계통에서 수소와 방사성기체를 배출하면 기체폐기물처리계통으로 연결된다. 원전에서 수소가 폭발제한치 이상으로 존재하는 계통은 냉각재계통과 기체방사성폐기물처리계통이다. 이 계통에서 수소를 폭발범위 밖으로 조절하기 위해서는 수소기체가 4% 이상일 경우 수소를 4% 이하로 희석조절하거나, 산소농도를 4% 이내로 조절하는 것이다. 현재 대부분의 국내 원전에서 폭발성 기체를 폭발범위 밖으로 제한한 폭발성기체 감시계획서의 제한치는 “수소농도가 4% 이상일 경우 산소농도 또는 수소농도를 체적비 4% 이내”이다. 냉각재 배출기체의 주성분은 수소이므로 합리적인 제한치 만족방법은 수소를 4% 이하로 희석하는 것보다 산소를 4% 이내로 희석하는 것이다. 대부분 원전의 계획서는 수소농도가 4% 이상일 경우 산소농도를 4% 이내로 기술하고 있다. 그러나 일부 국내 원전의 기체 감시계획서는 산소농도를 2% 이하로 제한하고 있다. 이는 안전범위인 산소농도 2~4% 범위에서도 산소농도를 2%

이하로 관리해야 하는 상황이 자주 발생하며 이를 해소하기 위해 질소기체로 희석운전이 요구되어서 기체방사성폐기물의 배출량 증가요인이 되며, 원전의 수많은 안전인자를 동시에 감시하고 관리해야 하는 운전원의 업무부하가 상승한다. 결과적으로 산소농도를 낮게 운영하는 것은 원전의 안전운전과 방사성기체 배출량을 저감해야 하는 방사성폐기물 배출감소 정책과 상충된다. 따라서 폭발성기체감시 계획서와 절차서의 감시계획 내용을 “수소농도가 4% 이상일 경우 산소농도 또는 수소농도를 체적비 4% 이내로 제한”으로 일치시키는 것이 바람직하다.

3. 결론

원전에서 규제기준에 따라 작성된 폭발성기체 감시계획서는 수소 및 산소 농도관리 기준을 너무 보수적으로 운영한다. 수소-산소 폭발 농도범위는 수소농도 하한치인 4%(산소 96%)이상과 수소농도 상한치인 95%(산소 5%)이하이다. 수소-산소 폭발 방지를 위한 농도범위를 잘 반영한 제한치 표현은 “수소농도 또는 산소농도가 체적비 4% 이내로 제한”하는 것이다. 보수적인 수소-산소 농도관리는 발전소의 방사성폐기물처리계통에서 방사성기체의 붕괴를 도모하여 방사성기체의 배출량을 낮추어야 하는 방사성폐기물배출 저감정책과 운전원의 업무 집중에 상충되므로 기술지침서에 따라 “수소농도가 4% 이상일 경우에 산소농도 4% 이하로 관리 또는 수소농도를 4% 이하로 관리”하는 것이 타당하다.

4. 참고문헌

- [1] Explosion Characteristics of Hydrogen-Air and H₂-O₂ Mixtures at Elevated Pressures, Schroeder, V. BAM, Berlin, Germany.