

국내 원자력발전소의 수소점화기 제어성능분석

최영·박종화

한국원자력연구소

1. 서론

원자력발전소에서는 심각한 사고로 인한 고온상태에서 원자로내부의 물질이 산화반응하여 대량의 수소가 발생한다. 이 때 수소가 폭발하면, 원자력발전소의 건전성에 중대위험이 발생한다. 실제로 미국원자력발전소인 쓰리마일원전(TMI-2) 사고 이후 지금까지 중대사고시 수소거동에 대하여 여러 연구기관에서 많은 연구가 수행되었으나 아직도 많은 기술적 불확실성이 존재한다. 미국 원자력 규제위원회(US NRC)는 원자로/격납용기내 수소거동 현상을 중대사고 8개의 불확실성 항목 중의 하나로 지정하여 이에 대한 연구를 계속하도록 하고 있다. 이에 따라 대부분의 원전 보유국이 자국의 사정에 적합한 수소제어 관련 규제지침을 마련하고 있고 국내에서도 운영허가조건으로 중대사고시 수소제어대책인 수소제어 규제지침을 마련하고 있다. 이러한 규제지침에는 국부 수소농도 제한과 적절한 수소제어설비의 설치를 요구하고 있다. 또한 중대사고시 수소제어의 최종방안으로 설치 예정인 수소점화기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)는 이미 그 성능이 충분히 입증되었으나 효과적인 성능발휘를 위해서는 적절한 성능해석과 설치위치 선정이 무엇보다 중요하다. 본 연구논문을 통해 축적된 자료들은 곧바로 원자력발전소의 설계사항에 직접적으로 영향을 줄 것이며 향후 건설하는 차세대원전에 대한 안전지침에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 분석방법

2.1 수소발생거동

중대사고가 발생하여 노심이 노출될 경우 핵연료 피복재인 지르카로이는 수증기와 산화반응을 일으켜 많은 수소를 발생시킨다. 동시에 이 반응은 매우 많은 열을 발생시키는 발열반응이므로 사고진행을 촉진시켜 핵연료 및 원자로파손에 크게 영향을 미친다. 또한 노심이 용융되는 중대사고시 발생하는 다량의 수소는 기폭하여 폭발반응을 일으킴으로써 격납건물에 직접적인 하중을 가하여 격납건물의 건전성을 위협하게 되며 안전관련 기기에 손상을 유발시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 TMI-2사고에서 핵연료 피복관/노심용융물과 수증기와의 반응으로 다량의 수소가 발생하여 격납용기로 방출되었다. 그러므로 노심손상을 동반하는 중대사고시 수소 생성 공급원으로서 핵연료 피복관의 산화반응은 중요한 현상으로 대두되어 왔다. 이 Zr산화반응은 다음과 같은 발열반응으로 표시된다.



고온에서 수증기와 Zr의 반응현상이 매우 신속하므로 특히 중대사고시에 첫째식이 더욱 중요한 반응이다.

초기의 지르카로이 피복관은 고온에서 안정된 순수 β -Zr으로만 구성되어 있다. 그러나 수증기와 고온의 피복관이 반응함에 따라서 피복관내에 Zr은 산소농도에 따라서 3가지 종류로 구분된다. 즉 피복관 외벽부터 산소농도가 높은 순서대로 ZrO_2 , α -Zr, 그리고 β -Zr로 구성된다.

2.2 PAR의 독립모듈 개발

국내에서 개발중인 중대사고해석코드(MIDAS)에서 사용하기 위한 독립모듈을 개발하기 위해 AECL에서 개발한 PAR 실험결과를 이용하여 상관식[1]을 작성하였다. AECL 실험결과는 Fig. 1로 주어지며, 이 그림으로부터 도출한 수소 제거율, R,은 다음과 같은 간단한 식으로 기술된다:

$$R \text{ (kg/sec)} = 1.54 * (\text{H2OCP} - 0.54) / 3600 * \text{NPAR}$$

여기서, NPAR는 격납건물의 분석 제어체적 안의 PAR 개수이고, H2OCP는 수소의 농도를 %로 나타낸 값이다.

2.3 PAR의 독립모듈 평가

PAR에서의 수소 제거 능력을 평가하기 위해서, 먼저 일정한 수소 제거율을 가정한 독립 프로그램을 개발하고 MELCOR[2]에 연결하였다. 독립 코드의 접목 상태를 확인하기 위하여, 제어 체적은 하나만 정의하고 일정한 비율로 수소를 주입하는 상황에서 제어체적에서의 연소에 관련된 기체의 농도 및 질량, 그리고 연소 시점 등을 검토하였고, 모든 결과가 예상과 같음을 확인하였다.

다음 단계로는 MELCOR에 AECL 상관식을 추가하여 제어 체적에서의 수소 농도에 따라 수소가 제거될 수 있도록 코드를 확장하였다. 모델 검증을 위하여 분석 계통을 두 개의 제어체적 (CV801과 CV802)과 노드 사이의 유로로 간단하게 정의하고, 수소는 CV801로 0.05 kg/sec의 일정한 비율로 100초 동안 주입되는 것으로 가정하였다. PAR의 효과를 비교하기 위하여 PAR가 없는 경우와, CV801에 한 개와 10개가 설치된 세 가지 경우를 분석하였다[3].

CV801에서의 PAR의 유무와 개수에 따른 수소와 산소 물 비가 각각 Fig. 2와 3에

나타나 있다. PAR가 없거나 하나만 있는 경우에는 모의 시작 이후 80초를 지나 수소 물 비가 0.1에 도달하고, 수소연소가 발생하여 기존의 수소가 다 연소하면, 다시 주입되는 수소에 의해 물 비가 증가한다. 그러나, 10개의 PAR가 작동하면, 수소 농도 증가에 따라 제거량도 따라 증가하여 모의 시작 후 100초가 지나도 연소 기준인 0.1에 도달하지 않는다. 모의 초기에 PAR의 유무에 상관없이 수소 물 비가 비슷하게 변하는 이유는, 수소 물 비율이 작아 PAR의 수소 제거 효과가 미미하기 때문이다. CV801에서의 산소의 거동은 초기 값에서부터 연소되는 정도에 따라 감소하며, 10개의 PAR가 가동되는 경우 연소량이 많아 산소의 물 비가 더 빨리 감소한다.

Fig. 4와 5는 CV801과 CV802에서의 대기 온도를 각각 보여준다. CV801에 PAR가 없는 경우, 83초에 수소 연소가 일어나기 전까지 대기 온도는 서서히 증가하는 반면, 한 개의 PAR가 작동하면 PAR가 없는 경우보다 PAR 내의 발열반응으로 공기온도가 약간 높으며, PAR가 없는 경우에 비하여 수소 연소가 단지 2,3초 늦어진다. CV801에 10개의 PAR가 가정된 경우에는 대기의 온도는 지속적으로 증가하지만, 100초까지 수소연소가 발생하지 않는다. CV802는 수소의 농도가 CV801보다 낮아 CV801에 비하여 절대 온도가 낮게 나타나나 온도 거동은 CV801과 유사하다. Fig. 6은 격납건물의 압력을 나타내며, Fig. 4의 대기 온도 거동과 유사하다. CV801과 CV802의 압력은 동일하게 계산된다. 연소가 일어나는 경우 압력은 3.75 기압까지 상승하며, 이 값은 기존 연소 모델에서 계산된다.

3. 분석 결과

3.1 국내 원자력발전소에의 PAR모델적용

APR-1400을 대상으로 위에서 개발한 PAR 모듈을 이용한 MELCOR로 TMLB' 사고를 모의하였다. TMLB'사고는 발전소 내부/외부의 교류전원이 상실되고, 보조급수도 고장나서 증기발생기 이차 측으로의 모든 급수가 중단되며, 터빈 우회계통 및 대기 방출밸브 (Atmospheric Dump Valve)가 작동되지 않아 이들을 통한 이차 측 열 제거가 불가능한 사고이다. 이 사고는 사고 발생 후 약 14,000초경에 원자로가 파손되어 용융물의 방출로 인하여 격납건물 내에 수소가 급격히 증가한다.

격납건물에 설치된 PAR의 성능을 파악하기 위해서 상부 돔에 PAR가 있는 경우 (10개 가정)와 없는 경우를 선택하여 비교하였다. Fig. 7은 CV808에서 제거되는 수소의 양을 보여준다. PAR가 없는 경우, 사건발생 후 약 23,900초경에 상부 돔에서 급격한 수소 연소반응이 발생하여 약 350 kg의 수소가 연소되지만, PAR를 설치하는 경우에는 약 14,000 초 이전부터 PAR로 인해 수소가 소진되며, 25,000초까지 꾸준히 제거되고 있다. 시간에 따른 수소 물 비율이 Fig. 8에 제시되어 있다. PAR가 작동되지 않으면, 원자로 파손 후에, 수소 물 비가 8%를 넘어 연소를 유발하지만, PAR가 가동하는 경우는

농도가 6%이하로 유지되어 수소 연소가 발생하지 않음을 보여준다. 격납건물 압력 관점에서 보면, Fig. 9에서 보이듯이, PAR가 없는 경우 23,900초 부근에서 예상되는 수소 연소를 PAR가 작동함으로 격납건물의 순간적인 압력 상승을 막을 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 PAR (한 개와 10개) 모델을 간단한 예를 들어 검증한 후 실제 APR-1400에서의 PAR의 효과를 분석하였다[4]. 간단한 test 검증모의에서는 단일 PAR로는 수소 제거 효과가 충분하지 않아 급격한 연소반응이 발생하는 반면, 10개의 PAR가 작동되면 수소 제거 효과가 월등하여 100초까지 수소가 수소 연소 한계 내로 제어됨을 알 수 있다. 실제 발전소(APR-1400)에 적용한 경우에도 상부 돔에 PAR를 모의한 경우, PAR로 인한 수소제거 효과를 충분히 확인 할 수 있었다. 결과적으로 본 연구를 통해 모의한 PAR 모듈과 새로이 계산된 결과는 수소 제어 방안을 도출하는데 유용하게 사용되어, 축적된 자료들과 가동 중 및 향후 건설하는 차세대원전에 대한 안전지침에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1]. J.V. Loesel Sitar, et al., "Qualification of passive Autocatalytic Recombiners for Post-LOCA Hydrogen Mitigation in CANDU Stations"
- [2]. U.S.NRC, "MELCOR Computer Code Manual: Primer and Users' Guides Version 1.8.4," NUREG/CR-6119, Vol.1, Rev.1, July 1997.
- [3] 최영, 외, "MELCOR코드를 이용한 차세대 원자로 모델링," KAERI/TR-1847/ 2001, June 2001.
- [4]. KAERI/TR-1677/2000, "Accident Analyses on TMLB' and LOCA for KNGR using MELCOR Code", November 2000.

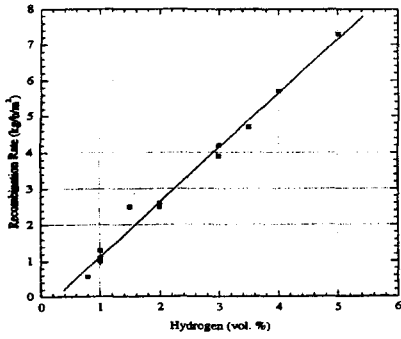


Fig. 1. AECL PAR의 수소 제거 비율

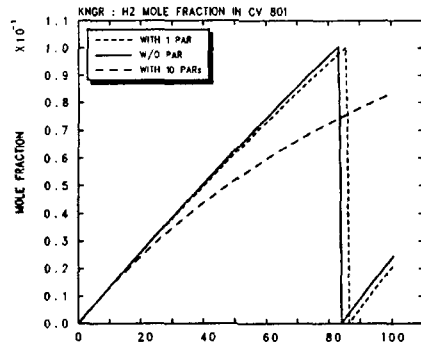


Fig. 2. CV801-수소 연소에 따른 수소 몰비 거동

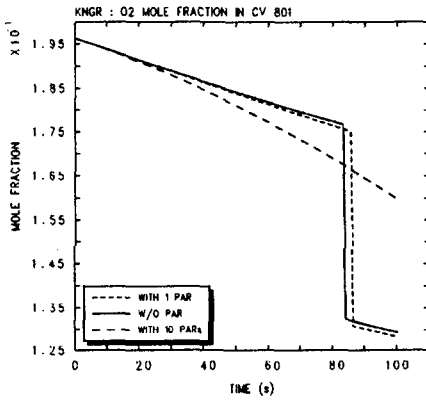


Fig. 3. CV801-수소 연소에 따른 산소 몰비 거동

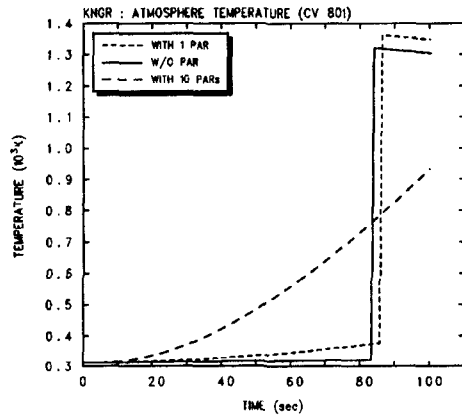


Fig. 4. CV801-수소연소에 따른 온도 거동

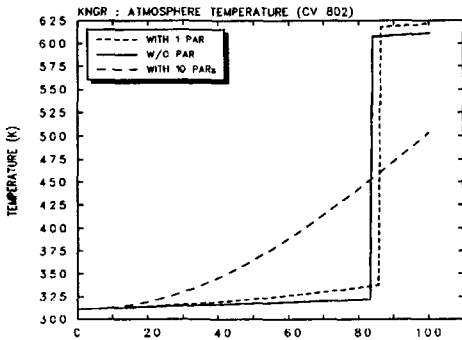


Fig. 5. CV802-수소 연소에 따른 온도 거동

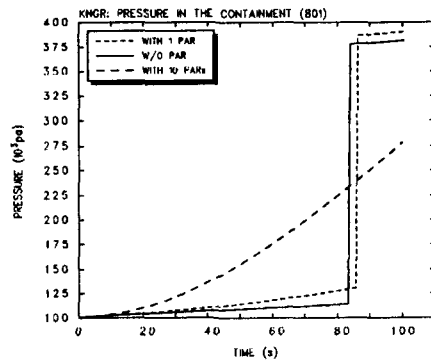


Fig. 6. CV801-수소 연소에 따른 압력 거동

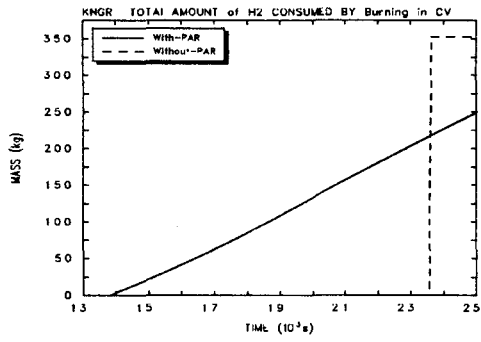


Fig.7. PAR의 유무에 따른 상부 돔에서의 제거되는 수소량 비교

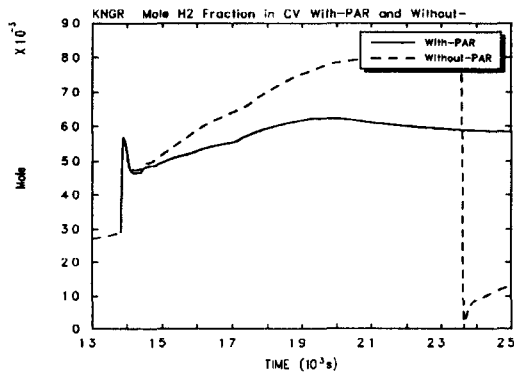


Fig.8. PAR의 유무에 따른 격납건물 상부 돔에서의 수소 몰비 비교

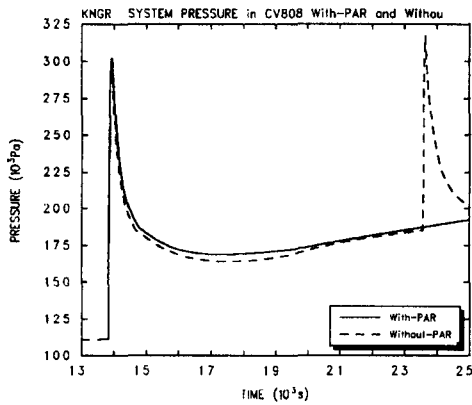


Fig.9. PAR의 유무에 따른 격납건물 압력 비교