

수소공정시설에서의 안전 해석 방법론 연구

조남철 · 황석원 · 제무성 · 양준연*

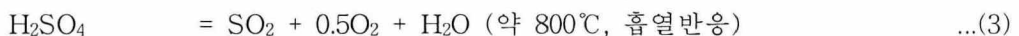
한양대학교 원자력공학과 · *한국원자력연구소

1. 서 론

현재 세계는 인구 및 에너지 소비의 증가에 따른 화석연료의 고갈로 제한된 자원을 극복하고 지속가능한 성장을 위한 새로운 에너지원 개발이 시급해 지고 있다. 수소는 CO₂를 방출하지 않는 에너지 운반자로서 이상적인 특징을 가지고 있다. 따라서 수소에너지시스템의 개념이 전 세계의 관심을 끌었으며, 현재 요구되는 막대한 양의 수소를 생산하기 위하여 효율적인 수소생산시스템의 개발이 긴급한 논점으로 부상하고 있다. 이에 거론되고 있는 수소생산방법 중 원자력 에너지를 이용한 수소생산은 어떠한 CO₂도 방출하지 않고 막대한 양의 에너지를 안정적으로 공급할 수 있다는 장점을 가진 잠재성있는 후보이다. 열원으로는 높은 수준의 고유안전성을 특징으로 하고, 1000°C의 열을 공급할수 있는 고온가스냉각로가 이 목적에 적합하며, 수소생산을 위한 열 화학적 물 분해과정은 고온가스냉각로에서 생산한 높은 온도의 열을 효과적으로 사용하는 방법이다. 요오드와 황산을 사용하는 IS Process는 General Atomic Co.에 의해 제안되어지고 연구되어진 열화학적 공정으로 이 공정은 고온가스냉각로에 의해 만들어진 다량의 열을 큰 열 흡수와 함께 흡열반응이 일어나도록 하기위해 원자력에너지를 소비하는 매력적인 특징을 가지고 있다.¹⁾⁻²⁾ 현재 일본과 유럽이 반응모드와 분리생성물의 분할에 대한 서로 다른 접근방법으로 연구하고 있으며, 우리나라 또한 IS Process에 대한 연구를 시작하고 있다.³⁾⁻⁷⁾ 이에 본 연구에서는 추후 건설될 수소제조시설의 안전성 평가를 위해 IS Process를 이용한 수소제조시설의 안전성 평가방법 체계를 구축하고자 하였으며, MLD를 이용하여 초기사건의 도출과 그에 대한 사건수목을 도출하였다. 또한 제조공정중의 사고시나리오를 분석하여 향후 안전연구개발 방향을 설정코자 하였다.

2. IS Process

IS 공정은 다음과 같은 3단계 화학반응식에 의해 수소를 제조한다. 이들 화학반응의 수행과정을 반응온도와 공정에 따라 도시하면 Fig.1 과 같은 3가지 공정으로 구성된다.



분해반응이라 불리는 식 (1)은 이산화황(SO₂)가스를 흡수하는 발열반응으로 20~100℃에서 자연적으로 진행되며, 식 (3)의 황산 분해반응 공정은 흡열반응으로 2단계로 진행된다. 황산(H₂SO₄)가스는 400~500℃에서 자연적으로 물(H₂O)과 슬폰(SO₃)으로 분해되며, 분해된 슬폰(SO₃)은 약 800℃에서 고체 촉매에 의해 다시 이산화황(SO₂)과 산

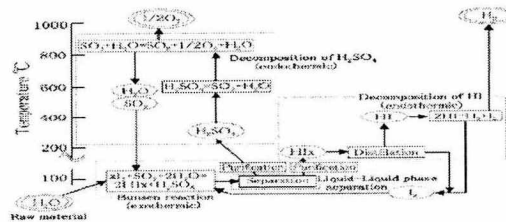


Fig.1 Reaction scheme of the IS process

소(O₂)로 분해된다. 식 (2)의 요오드화수소(HI) 분해반응 공정은 기상 또는 액상으로 진행되는 흡열반응이다.⁸⁾ 이 공정은 현재 일본의 원자력연구소(Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI)에서 그 실증 실험 및 폐 사이클 실험을 성공시킨 바 있다.

3. 방법론

본 연구에서는 수소제조공정의 안전성 평가방법을 Fig. 2와 같이 다음의 2단계로 분리하였다.

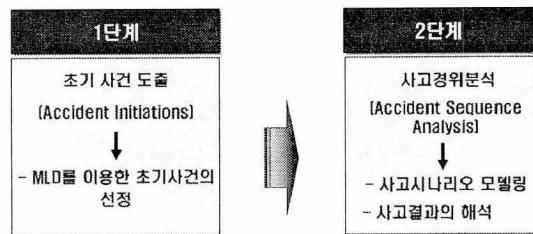


Fig. 2 Frameworks of assessment in hydrogen production system

3.1 초기사건 선정

IS Process에서 초기사건의 분석은 공정 중에 위험을 일으킬 가능성이 있는 사건들을 선정, 그룹화, 선별, 발생빈도를 평가하는 것이다. 이러한 초기사건의 선정방법은 체계적이고 논리적 방법을 사용하는 형식적 기법과 기존의 경험 자료를 바탕으로 하는 경험 기법이 이용되고 있다.⁹⁾ 본 논문에서는 논리적이면서 연역적 방법인 MLD (Master Logic Diagram)를 사용하여 초기사건을 선정하였다.

MLD구성의 출발점은 정점사건을 정의하는 것으로 시작한다. MLD의 정점사건은 시

시스템의 정지를 유발할 수 있으며, 위험을 야기할 수 있는 공정 내 화학물질의 유출로 적용하였다. IS공정은 화학물질의 차이에 따라 다음의 4개의 섹션으로 구분할 수 있으며, 이를 MLD에 적용하여 보면 Fig. 3과 같다.

- (1) 분센 반응 구간
- (2) H₂SO₄분해공정 구간
- (3) HI 분해공정 구간
- (4) H₂ 구간

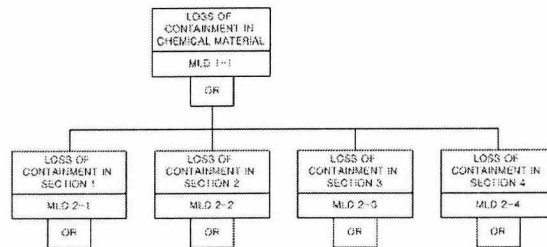


Figure3. MLD of the IS proces

이중 본 논문에서는 네 개의 구간 중 사고발생확률이 가장 높을 것으로 판단되는 황산 분해공정에 대해 우선적으로 MLD를 적용하였으며 최종 분해된 MLD는 Fig.4와 같다.

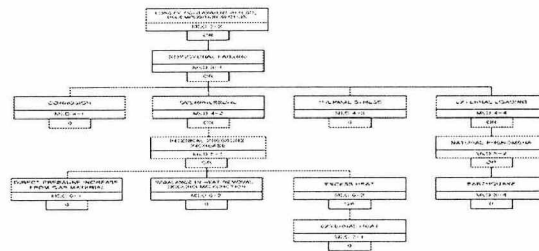


Figure 4. MLD of the H₂SO₄ decomposition section

정점사건인 ‘황산분해공정 물질의 유출(Loss of Containment in H₂SO₄ decomposition section)’은 배관파열, 펌프 및 기계 구동장치등 구조물의 파손에 의해 발생된다. 이러한 구조물의 파손원인은 강 부식성 원료인 황산에 의한 부식, 고압, 고온에 의한 열 피로, 외부하중등에 의해 발생된다. MLD 4-2의 고압의 원인은 내부 압력 증가와 배관내의 압력 쇼크로 나눌 수 있는데, 압력쇼크의 경우 발생빈도가 매우 희박하므로 제외하였다. MLD 5-1의 내부압력증가는 액상의 황산이 증발되면서 생기는 기상의 SO₂로 인한 직접적인 압력증가와 기상의 SO₂가 액상으로 변환될 때 냉각실패로 인한 압력증가, 내부화재로 인한 압력증가로 분해되었다. MLD 4-4의 외부하중은 자연현상인 지진에 의한 배관 파손을 들 수 있으며, 외부화재, 침수, 태풍은 발생빈도가 낮

고 시스템이 건물의 외벽에 의해 보호되므로 제외 하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 IS공정 중 황산분해공정의 초기사건은 다음과 같이 분류 될 수 있다.

- (1) 부식과 열 피로에 의한 배관 및 구성장치의 파손
- (2) 증발된 SO₂기체에 의한 압력증가
- (3) 기상의 물질이 액상으로 변환될 때 냉각실패로 인한 압력증가
- (4) 내부화재에 의한 압력증가
- (5) 지진

3.2 사고경위 분석

위에 언급한 바와 같이 IS공정 중 황산분해공정의 초기사건은 5가지로 분류 되었다. 본 논문에서는 이중 부식에 의한 배관 및 구성장치의 파손을 초기사건으로 하는 사고에 대하여 사고경위를 분석하였다. 부식에 의한 배관 및 구성장치의 파손은 현재 일본에서 실험한 lab-scale test에서 실제로 매우 빈번하게 발생한 사고로 발생빈도가 높고 사고결과 역시 강한 산성 물질과 독성물질의 유출로 인하여 피해규모가 가장 클 것으로 예상되기 때문이다. Fig. 5는 사건수목(Event Tree)을 사용하여 나타낸 사고경위이다.

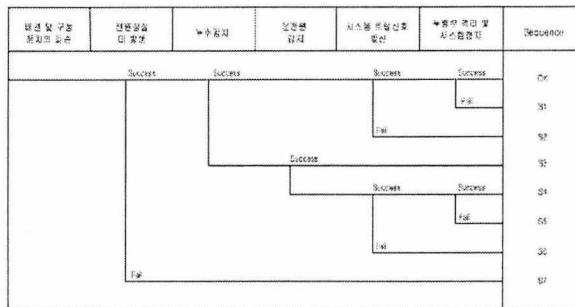


Fig. 5 Event tree of pipe and equipment breakdown

배관 및 구성장치의 파손에 의해 누출이 발생되면 사건 발생 후 미션타임중의 상용 전원 및 비상전원의 상실이 발생해서는 안 된다. 현 상태에서는 누설감지 시스템의 상세한 사항이 아직 상정되지는 않았지만, 본 평가에서는 필요한 부분에 누설 감지기가 있다고 가정하여 사건수목의 정점사건에 포함하였다. 또한 누설감지기에 의한 누수 감지가 실패하게 되더라도 운전원이 유량의 변화나 수소생산율의 저하 등을 통해 누수 사실을 감지하게 되면 사고를 미연에 방지할 수 있다. 누수가 감지되고 시스템의 트립 신호가 발생되며 누출부의 격리 및 시스템 정지로 인해 사고가 조기에 진압되며, 그 외의 경우는 안전설비의 기능상실로 인한 누수가 계속적으로 발생된다. 본 사고시나리오의 정량화는 적절한 데이터를 통해 추후 정량화 되어질 예정이며, 사고 발생확률을 통해

안전 목표의 설정 및 설계의 타당성을 검토할 수 있다.

4. 결론 및 토의

에너지자원의 고갈로 국내에서는 IS공정을 이용한 수소제조방법에 대한 연구가 시작되었으며, 건설을 계획하고 있다. 이에 본 연구에서는 IS공정의 안전성평가와 건설될 수소제조시설의 안전성 향상을 위한 IS공정의 안전성평가체계를 구축하였다. 수소제조시설의 평가방법은 2단계로 분리 하였으며, 첫 번째 단계에서는 MLD를 이용한 초기사건을 도출하였으며, 두 번째 단계로 사고경위분석을 위해 사건수목을 사용하였다. 이러한 평가체계에 맞추어 MLD를 적용하여 IS공정중 황산분해공정의 초기사건을 도출하였으며, 도출된 초기사건중 배관 및 구성장치의 파손에 대한 사고경위를 분석하였다. 추후 적절한 데이터를 통해 정량화하여 사고발생확률을 통해 안전목표의 설정 및 설계의 타당성을 검토할 예정이다. 이는 추후 IS공정을 이용한 수소제조시설의 안전성 평가에 활용되어질 수 있으며, 시스템의 안전성 향상 및 사고예방을 위한 예비개념설계에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Shinji Kubo., Seiji Kasahara, Hiroyuki Okuda, Atsuhiko Terada, Nobuyuki Tanaka, Yoshitomo Inaba, Hirofumi Ohashi, Yoshiyuki Inagaki, Kaoru Onuki, Ryutaro Hino, A pilot test plan of the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process, Nuclear Engineering and Design 233, 355-362, 2004
- 2) J.H. Norman, G.E. Besenbruch, L.C. Brown, D.R. O'Keefe, C.L. Allen, Thermochemical Water-Splitting Cycle, Bench-Scale Investigations and Process Engineering, GA-A 16713, General Atomics (GA), (1982).
- 3) G. De Beni, G. Pierini, B. Spelta, "The reaction of sulfur dioxide with water and a halogen. The case of iodine: Reaction in presence of organic solvents." Int. J. Hydrogen Energy, 5, 141-149 (1980).
- 4) S. Sato, S. Shimizu, H. Nakajima, Y. Ikezoe, "Nickel-Iodine-Sulfur process for hydrogen production," Proc. 3rd World Hydrogen Energy Conf., Tokyo, Japan, June 1980, vol.1, pp.389-400 (1980).
- 5) T. Kumagai and S. Mizuta, "Laboratory scale demonstration of the Mg-S-I cycle for thermochemical hydrogen production." Ind. Eng. Process Des. Dev., 24, 795-802 (1985).
- 6) S. Shimizu, K. Onuki, H. Nakajima, Y. Ikezoe, S. Sato, "Laboratory scale demonstration of CIS process." Int. J. hydrogen Energy, 12, 687-691 (1987).

7) I.T. Oeztuerk, A. Hammache, E. Bilgen, "A new process for oxygen generation step for the hydrogen producing sulfur-iodine thermochemical cycle" Trans. IChemE., 72 Part A 241-250 (1989).

8) 황갑진, 김종원, 심규성, "열화학적 수소제조 IS 공정"

9) 한석중, 박진희, 장승철, "정지저출력 PSA에서 주논리도를 이용한 초기사건 선정" 한국원자력연구소, pp. 35, (2003)