

증기폭발의 개관



김 병 주
홍익대학교 기계공학과 교수

●1954년 5월 15일 생
●이상유동 열전달과 원자로 안전성해석을 전공하고 열용량, 비등열전달, 이상유동동요, 이상유동에 의한 구조물 진동 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

모든 폭발현상은 한 형태의 에너지가 다른 형태로 급속히 변환하는 과정을 포함한다. 초기에 이 에너지는 주위로의 소산이 미미한 상태로 부터 상대적으로 약한 활성화에너지에 의해 폭발과정이 유도되어 주위의 구조물이나 인명에 대한 파괴적인 기계일로 변환되며 대부분의 경우 신속한 에너지 변환 과정은 매개체인 고압가스나 기체의 생성에 의해 수행된다. 이러한 폭발현상은 불안정 상태로 존재하는 핵(핵폭발), 반응성 화합물(화학폭발), 압축가스(고압탱크 폭발), 전압구배(폭발선, exploding wire) 등으로 부터 발생할 수 있으며 또한 액체의 높은 열용량에 의해서도 발생할 수 있다.

열용량에 의한 폭발 현상은 용해되지 않는 두 액체, 즉 저온액체(냉각수)의 비등점보다 높은 온도의 고온액체(연료)가 휘발성이 강한 냉각수와 접촉할 때 연료의 내부에너지가 냉각수로 전달되면서 발생한다. 연료와 냉각수가 접촉하면 연료의 높은 내부에너지는 냉각수의 비등현상을 유도하여, 연료와 냉각수는 증기막에 의해 분리된 상태로 밀도와 속도 차에 의해 혼합된다. 만약 냉각수의 급격한 증발에 따른 계의 가압화가 신속히 주위로 완화되지 않을 경우 연료와 냉각수, 그리고 증기의 혼합물은 충격파의 생성과 더불어 주위로 팽창한다. 이러한 형태의 폭발이 발생하기 위해선 냉각수와

연료사이에 형성되는 열전달의 시간척도가 연료-냉각수-증기 혼합물의 팽창의 시간척도보다 짧아야 하며 이는 혼합 과정 중 연료가 작은 입자나 덩어리로 파괴되어 연료-냉각수 간의 전열면적이 순간적으로 증가하는 데 따른 것으로 이해된다. 물론 폭발과정중 연료의 산화현상이나 수소의 생성은 있으나, 그 영향은 극히 작으며 결코 화학폭발의 일종이라고 할 수 없다. 이와같이 연료가 냉각수와 혼합할 때 연료의 열에너지가 주위에 대한 기계일로 변환되는 현상을 열폭발(thermal explosions), 증기폭발(vapor explosions), 혹은 물리적 폭발(physical explosions)이라고 하며 원자력 산업의 경우 연료-냉각수 상호작용(fuel-coolant interactions) 또는 수증기폭발(steam explosions)로 불리어지고 있다.

본 글에서는 증기폭발 현상에 대한 기본적인 이해를 돕기 위해 제시된 기존의 실험 및 이론적 연구내용을 비교, 분석함으로써 차후 증기폭발의 예방 및 현상의 생산적 이용을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 증기폭발의 실례

폭발적인 기체의 생성은 제철, 제지 및 원자력등의 산업체에 있어서 잠재적 재해 발생의 요인으로 고려되고 있다. 열용량이 크게 다른 이종의 액체가 접촉, 혼합하는 모든 경우에 증기폭발의 발생가능성은 배제될 수 없으며 산업

현장에서 발생한 예는 다음과 같다.

(1) 원자력 산업

미국의 경우 1962년 원자로의 비정상 거동을 연구하기 위하여 가동중단 상태의 실험 원자로에 대해 주제어봉이 제거되었을 때 예기치 않은 원자로의 파괴사고가 발생하였다.⁽¹⁾ 사고해석의 결과 핵연료봉은 핵분열에 의한 발열로 녹아내려 냉각수에 산개되었으며 수증기폭발과 함께 계의 압력은 21MPa 이상 상승한 것으로 밝혀졌다. 상업용 원자로의 경우 수증기폭발의 발생 가능성은 연간 0.0002%로 극히 적다고 하나 발생에 따른 재해는 심각할 것이며 1986년 4월 소련의 체르노빌 원자력 발전소의 참사도 그 한 예로 꼽을 수 있을 것이다.

(2) 제철 및 알루미늄 산업

알루미늄 주조과정에서 용융상태의 알루미늄이 물이 담겨진 용기내에 부주의로 었질러 졌을 때⁽²⁾ 혹은 제철산업에서 용융상태의 철이 물과 접촉, 혼합하는 과정에서 폭발사고가 발생하였으며⁽³⁾, 1963년 캐나다의 퀘벡에서 발생한 증기폭발은 그 위험성을 잘 말해주고 있다.

“The foundry volume contained approximately 510000m³. At a ladle near the center of the building, 45kg of molten steel was spilled into a shallow trough located in the floor containing some 0.3m³ of water. The resulting explosion injured mill personnel (one fatally) and caused severe damage to the foundry building including the cracking of 0.5m thick concrete floor and damaging the exterior walls (a 30m section of one wall and a 15m section of another were blown out).”

(3) 펄프 및 제지산업

고온의 용융염(paper smelt, fused sodium carbonate)이 녹액(green liquor, 80%의 NaCO₃와 20%의 Na₂S)으로 채워진 용해 탱크에 주입되어 용해, 냉각될 때 제철산업의 경

우와 유사한 폭발사고가 발생하였으며⁽⁴⁾재해의 심각성은 낮으나 그 발생확율은 미국의 경우 연간 0.5%로 훨씬 높다.

(4) 석유산업

1960년대 저온 액화가스의 수송에 대한 안전성해석의 일환으로 액화천연가스가 물에 유출될 경우 그 증발율을 실험적으로 연구하던 중 화염을 동반하지 않은 상태에서 폭발현상이 발생하였다.⁽⁵⁾ 이는 상온의 물이 연료로 거동하여 액화천연가스의 급격한 상변화를 유도한 증기폭발로 밝혀졌으며 이 중의 위험성을 내포하고 있다. 즉 증기폭발에 의한 충격에너지와 더불어 가연성 가스를 높은 율로 생성시켜 인화에 의한 화학에너지의 방출을 초래할 수도 있을 것이다.

이 외에 화산의 폭발시 분출된 용암이 물과 물리적으로 반응하는 경우도 증기 폭발의 한 예로 지적되고 있다.⁽⁶⁾

3. 증기폭발의 연구

증기폭발의 전과정은 연료와 냉각수 사이의 에너지 전달 형태에 따라 그림 1에 주어진 4세

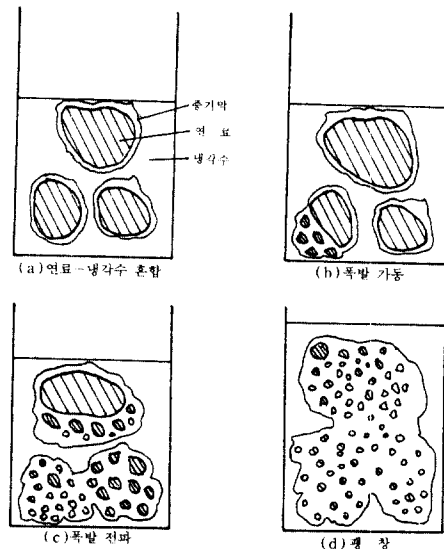


그림 1 증기폭발의 개념도

부과정으로 개념상 분리되고 있다.

- (1) 연료-냉각수 혼합(fuel-coolant intermixing) : 용융상태의 연료는 냉각수와 접촉하면서 냉각수의 막비등과 더불어 여러 덩어리로 나누어 지며 냉각수와 혼합된다. 이때 연료와 냉각수 사이의 증기막은 열전달율을 저하시켜 연료의 열에너지는 비교적 보존된다.
- (2) 폭발기동(explosion triggering) : 증기막에 의해 분리되어 있던 연료와 냉각수는 외부적 충격이나 증기막의 불안정성에 의해 직접 접촉하게 되며 일부 영역에서 형성되는 연료의 파괴과정에 의해 냉각수의 급격한 기화 및 국부 가압화로 이어진다.
- (3) 폭발전파(explosion propagation) : 가압화에 의한 압력파는 외부로 전파되어 주위의 연료-냉각수 계에 대한 활성화에너지로 작용한다. 따라서 연료파괴 및 폭발적인 증기생산은 연료-냉각수 혼합물의 전 영역으로 확산되면서 가속화되어 계의 압력은 급격히 증가한다.
- (4) 팽창(expansion) : 고압의 연료-냉각수-증기 혼합물은 내, 외부의 구속적 관성력을 능가하여 팽창하며 주위에 대해 기계적 일을 수행한다.

이러한 세부과정의 내용은 연료와 냉각수간의 초기 및 경계조건에 의해 결정되는 기하학적 접촉양식 즉,

- 연료의 냉각수내 주입
- 냉각수의 연료내 침입
- 연료와 냉각수의 성층형 접촉

의 각 경우에 따라 수정될 수도 있을 것이다.

증기폭발에 대한 연구는 폭발현상의 규모에 따라 소규모와 대규모로 구별된다. 일반적으로 킬로그램 단위의 연료와 냉각수가 혼합, 반응하는 경우를 대규모 증기폭발로 규정하며 증기폭발의 폭발성(explosivity), 즉 폭발에 의한 기계일의 연료의 초기 열에너지에 대한 비인 변환비(conversion ratio)를 밝히기 위해 수행되고 있다. 이에 비해 수 그램의 연료와 냉각

수의 혼합시 발생하는 상호작용을 소규모 증기폭발이라고 하며, 하나 혹은 수 개의 용융상태의 액적을 냉각수에 주입시켜 상호작용을 유도한다. 소규모 증기폭발은 실제 현상을 대표할 수 없지만 대규모 증기폭발을 구성하는 단위세포로써 작용하는 것으로 이해되고 있다. 대규모 증기폭발은 국부영역에서의 소규모 증기폭발에 의해 유도되어 전체 혼합물로 전파되며 그 폭발성은 초기 혼합시 분쇄된 각 연료입자에 의한 소규모 증기폭발의 일의 합과 같다는 것이다. 따라서 소규모 증기폭발에 대한 이해는 대규모 증기폭발의 기동과정이나 연료파괴과정의 해석에 필수적이라 하겠다.

증기폭발현상에 대한 이해도는 아직 충분하지 않으나 제시된 실험 및 이론적 연구내용은 증기폭발의 각 세부과정에 대해 다음의 순서에 따라 기술하고자 한다.

- 연료-냉각수 혼합
- 연료 파괴와 폭발 기동
- 폭발 전파와 팽창

3.1 연료-냉각수 혼합

연료-냉각수 혼합과정은 열전달율이 막비등 영역의 저조한 상태에서 연료가 냉각수에 혹은 냉각수가 연료에 산개되는 과정이다. 이 혼합과정의 중요성은 연료-냉각수 계가 극안정 상태(metastable state)로 존재하는 지체시간(dwel time)동안 연료-냉각수 간의 노출면적이 점진적으로 증가하는 데 있으며 노출면적이 연료의 초기 열에너지의 큰 유실없이 충분히 증가한다면 잇따르는 폭발과정은 높은 변환율을 가질 수 있을 것이다.

혼합과정에 대한 연구는 혼합의 물리적 한계를 규명하기 위하여 연료와 냉각수간의 유체역학 및 열전달의 측면에서 수행되었다.

증기폭발에 있어서 혼합과정이 형성되기 위해선 우선 연료와 냉각수가 접촉할 때 그 경계면의 온도가 자연핵생성온도(spontaneous nucleation temperature)보다 높아야 한다는 주장이 제시되었다⁽⁷⁾. 이중매체의 접촉시 그 경

계면의 온도는

$$T_I = \frac{T_f + T_c \left(\frac{k_c \rho_c C_c}{k_f \rho_f C_f} \right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{k_c \rho_c C_c}{k_f \rho_f C_f} \right)^{1/2}} \quad (1)$$

이며 여기서 k 는 열전도율, ρ 는 밀도, c 는 비열이며 하첨자 f 와 c 는 연료와 냉각수를 나타낸다. 자연핵생성온도는 액체-액체 직접 접촉의 경우 완전히 적셔진 계에 대한 균일핵생성(homogeneous nucleation) 온도이며 경계면의 온도가 이 보다 높을 경우 접촉과 동시에 증기막이 형성되어 연료는 열에너지의 큰 유실없이 냉각수와 혼합할 수 있는 시간적 여유를 가질 수 있을 것이다.

연료가 냉각수에 주입되어 유동할 때 좀 더 작은 크기로 나누어 지며 냉각수와 충분히 혼합하기 위해선 표면에너지, 운동에너지 그리고 마찰소산 등을 극복할 수 있는 혼합에너지가 필요하다.⁽⁸⁾ 일련의 점진적인 혼합과정에 의해 체적이 V_f 인 연료가 반경이 R_f 인 구형입자로 나누어지면서 냉각수와 혼합하는 데 요구되는 최소에너지는

$$E_{\text{mix, min}} = 1.81 C_D \rho_c V_f \left(\frac{V_f^{2/3}}{t_m^2} \right) \left(1 - \frac{R_f^2}{V_f^{2/3}} \right) \ln \left(\frac{V_f^{1/3}}{R_f} \right) \quad (2)$$

이며 여기서 C_D 는 국부마찰계수, t_m 은 혼합시간이다. 따라서 연료의 위치에너지, 운동에너지, 혹은 내부에너지가 이 보다 훨씬 클 때 연료와 냉각수의 충분한 혼합이 가능할 것이다.

혼합에 의한 연료액적의 크기는 유동화 한계(fluidization limit)와 과도 제트 파괴(transient jet breakup)의 개념에 의해 구할 수 있다.

(1) 유동화 한계

증기폭발이 유도되기 위해선 냉각수가 그림 1-a와 같이 용융상태의 연료주위에 밀접한 상태로 존재하여야 한다. 냉각수의 기화에 따른 증기의 상방유동이 격렬할 경우 이는 주위 냉각수의 유체역학적 불안정성을 유도하여 임계

열유속(critical heat flux) 기구와 같이 용기내의 냉각수를 상방으로 밀어내어 일순 나누어졌던 연료 액적들이 증기내에서 재결합하는 혼합의 역과정을 초래할 수도 있을 것이다. 따라서 냉각수의 부양(levitation) 없이 혼합이 가능한 연료의 최소직경은 연료액적으로 부터 주위로의 전열율과 임계열유속에 의해 다음 식으로 주어지며⁽⁹⁾

$$D_{\text{min}} = \frac{6 m_f q''_{\text{drop}}}{\rho_f A_v q''_{\text{CHF}}} \quad (3)$$

여기서 m_f 는 연료의 총질량, A_v 는 용기의 단면적이며

$$q''_{\text{drop}} = \sigma T (T_f^4 - T_c^4) + h_{\text{film}} (T_f - T_{\text{sat}}) \quad (4)$$

로써 연료액적으로 부터 냉각수로의 복사 및 막비등 열전달율을 의미한다.

(2) 과도 제트파괴

혼합과정은 연료가 냉각수에 주입될 때 혹은 냉각수가 연료내에 침입할 때 제트파괴의 유체역학적인 기구로 설명될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 즉 연료 혹은 냉각수 제트의 표면에서 형성되는 Kelvin-Helmholtz 불안정성, 중력장내에서 수평액체층의 분리를 유도하는 Rayleigh파괴, 그리고 분리된 액적의 파괴를 초래하는 Taylor 불안정성 등에 의해 혼합과정은 발달할 수 있으며, 혼합시간은 용기의 구조 및 제트의 유속에 의해 결정된다. 따라서 혼합되는 연료나 냉각수 액적의 크기는 연료와 냉각수 사이의 밀도차, 상대속도, 가속도 그리고 혼합시간에 의해 구해지며 표면 불안정성에 의해 혼합과정이 주도될 경우 냉각수와 혼합하는 연료액적의 크기는 임계 파장(critical wavelength)으로 주어지고

$$\lambda_m = 2\pi \frac{3(\rho_f + \rho_i)\sigma_f}{2\rho_f \rho_i U_{\text{rel}}} \quad (5)$$

ρ_i 는 연속 유체, 즉 냉각수 혹은 냉각수 증기의 밀도, σ_f 는 연료의 표면장력, U_{rel} 는 연

료-냉각수 사이의 유동 상대속도이다. 이는 혼합 액적의 크기를 과대평가하는 것으로서 정상 상태 조건에 대한 제트혼합의 상한치로 고려되고 있다. 또한 불안정성 성장에 대한 특성시간 (characteristic time)은

$$\tau = \frac{5}{2} \frac{(\rho_f + \rho_i) \sigma_f}{(\rho_f \rho_i)^{3/2} U_{rel}^3} \quad (6)$$

이다.

연료-냉각수의 혼합과정은 외부분산력(external dispersive force)에 의해서도 유도될 수 있다⁽¹¹⁾. 대규모 증기폭발 실험(연료의 냉각수 내 주입)의 수행시 경우에 따라 냉각수 표면 가까이에서 폭발이 발생하였으며 이는 연료가 냉각수 표면을 통과할 때 그 충격에너지에 의해 신속히 혼합하기 때문으로 고려된다.

3.2 연료파괴 및 폭발기동

연료파괴 기구를 규명하기 위한 소규모 증기폭발실험의 대표적인 것으로 단일액적 주입실험⁽¹²⁾을 들 수 있다. 소규모 단일액적 주입실험에서는 구형의 금속액적을 수조의 냉각수에 주입시켜 상호작용을 유도하며 초기 및 경계조건은 표 1에 주어져 있다.

주입된 액적은 냉각수와 접촉하면서 막비등을 형성하고 기체막의 천이적 붕괴에 의해 자연발생적으로 혹은 외부충격에 의해 인위적으로 연

표 1 소규모 단일액적 연료-냉각수 상호작용 실험의 매개변수

연료액적	산화 철 (Iron Oxide, O/Fe-1.34)
온 도	2233K
질 량	0.04383g
직 경	2.78mm
냉 각 수	증류수
온 도	300K
깊 이	150mm
주 위	공기
압 력	0.083MPa

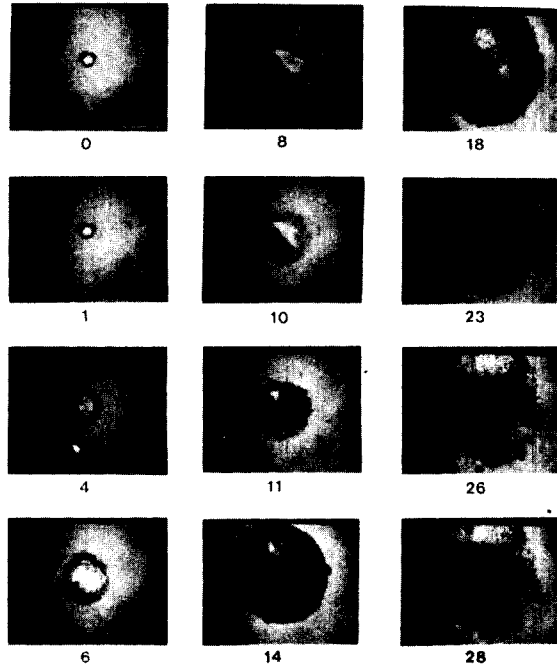


그림 2 용융 산화 철 액적의 파괴 및 상호작용의 과정

료와 냉각수의 상호작용이 시작된다. 이때 폭발기동 즉 연료 주위의 증기막은 그림 2와 같이 연료의 점진적인 파괴와 더불어 성장 및 수축을 반복하며 이는 연료가 완전히 응고될 때까지 혹은 연료의 파괴과정이 외부영향들에 의해 중단될 때 까지 계속된다. 그림의 각 정수는 폭발선의 폭발을 0으로 하여 고속카메라에 의해 촬영된 토막 순서를 의미하며 촬영속도는 약 170μsec/frame이다.

그림 3은 수조내 연료액적으로 부터 약 5cm 떨어진 곳에 위치한 압력변화기의 기록을 보여 주고 있다.

실험 후에 수거된 연료 파편의 검사결과 상호작용 과정동안 연료액적은 직경이 0.01~1.0 mm인 수 많은 입자들로 파괴됐음이 밝혀졌다.

소규모 증기폭발 실험에 의해 관찰된 사항은 다음과 같다.

(1) 연료와 냉각수의 초기접촉과 폭발사이에

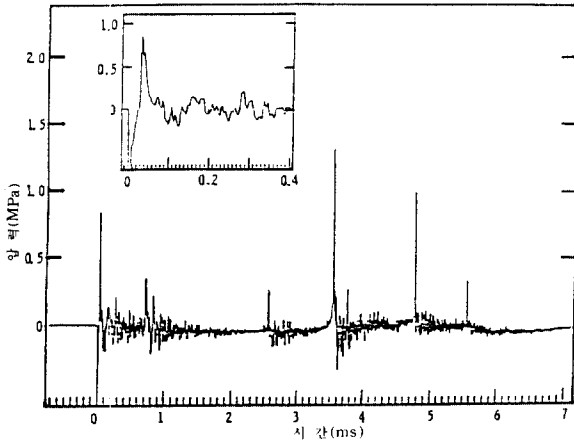


그림 3 소규모 단일액적 증기폭발 실험의 압력변환기 기록

는 지체시간이 있으며 이는 연료와 냉각수의 온도에 따라 변화한다.

- (2) 연료가 폭발기동 전에 대부분 응고하면 상호작용은 발생하지 않는다. 그러나 연료 표면이 국부적으로 응고한 경우, 증기폭발은 초기 및 경계조건에 따라 발생 가능하다.
- (3) 연료나 냉각수의 온도가 높을수록 상호작용의 발생가능성은 희박해진다.
- (4) 외부압력이 대기압보다 높을 경우(2~3 bar), 상호작용은 더욱 용이하게 유도되나 그 이상 외부압력이 증가하면(7bar 이상) 상호작용의 발생가능성은 낮아진다. 또한 외부압력이 증가 할수록 전 폭발과정의 소요시간은 짧아지며 폭발 연료파편은 더욱 미세해진다.
- (5) 연료나 냉각수의 점도가 클 경우, 증기폭발을 유도하기 위해선 외부기동력을 증가하여야 한다.

(1) 연료 파괴 기구(fuel fragmentation mechanisms)

연료의 파괴과정은 연료-냉각수 간의 열교환율을 급속히 증대시키는 요인으로써 이를 설명하기 위해 수 많은 가설들이 제시되었다. 일반적으로 연료파괴 가설은 파괴에 대한 원동력

혹은 연료-냉각수 사이의 접촉양식에 따라 유체역학적 영향과 열적 영향으로 대별된다.

(가) 유체역학적 영향

이종유체내에서 유동하는 액적의 안정성은 관성력과 표면장력의 비인 Weber수에 의해 결정된다.

$$We = \frac{\rho_c U_{rel}^2 D_a}{\sigma_f} \quad (7)$$

즉, 웨버수가 임계Weber수 (10~20)보다 크면 액적은 보다 안정된 작은 액적으로 부수지며 이는 연료가 냉각수에 주입될 때 혹은 액적주위에 생성되는 증기와와의 상대운동에 의한 연료파괴의 가설에 해당한다.⁽¹³⁾ 이와같은 파괴현상을 유도하는 유체역학적 기구로는 Kelvin-Helmholtz 불안정성, Rayleigh-Taylor 불안정성, 경계층 벗겨짐(boundary layer stripping) 등이 있다.

(나) 열적영향

열적영향은 연료파괴의 에너지원에 따라 다시 비등의 영향, 내부가압화의 영향, 응고의 영향 등으로 구별된다.

(i) 비등의 영향

연료가 냉각수에 주입되면 연료와 냉각수 사이의 에너지 교환은 냉각수의 비등과 더불어 시작된다. 이 때 연료 파괴 에너지는 천이비등 및 핵비등 영역에서 아냉비등의 특징인 기포의 격렬한 성장 및 붕괴로 부터 주어지며 만약 연료의 융점이 계의 최소막비등온도보다 낮거나 냉각수의 임계온도보다 높으면 연료파괴 과정은 불가능하다는 주장이 제시되었다⁽¹⁴⁾. 연료의 파괴에너지는 기포의 잠재에너지의 일부로써

$$E_b = \frac{4}{3} \pi R_m^3 |\Delta P| \quad (8)$$

로 주어지며 R_m 은 기포의 최대반경, ΔP 는 주위압력과 기포압력의 차이이다.

기포의 붕괴에 의한 연료의 파괴과정은 케비테이션 손상(cavitation damage)으로 부터 설

명될 수 있다. 기포가 액적 표면에서 붕괴할 경우 기포의 정점에서 냉각수 제트가 생성되며 이는 기포의 붕괴와 더불어 연료 표면을 향해 성장한다. 냉각수 제트가 연료의 표면장력 등을 이겨낼 수 있는 충분한 운동에너지를 가질 때 연료에 강제 침입하여 연료와 미세 혼합하고 잇따른 냉각수 제트의 기화는 폭발기포의 형상으로 성장할 것이다. 그러나 이와 같은 기구는 막비등 영역에서의 상호작용을 설명할 수 없으며 고온 표면에서 기포가 충분히 붕괴될 수 있는지는 의문의 상태로 남아있다.

(ii) 내부 가압화의 영향

연료액적이 냉각되는 동안 냉각수가 연료내부에 침입하면 이는 급격히 기화하여 연료의 내부가압화를 유발하며 고압증기의 팽창이 주위의 연료를 분쇄시킨다는 가설이다⁽¹⁵⁾. 내부 가압에 의한 연료의 파괴과정은 다음의 5과정으로 구성된다.

(가) 액체(연료)-액체(냉각수) 접촉

(ㄴ) 냉각수의 비등에 의한 기포 혹은 증기막의 형성

(ㄷ) 기포의 붕괴에 의한 충격파 전파 및 연료 내부의 공동기포(cavitation bubble)형성

(ㄹ) 공동기포에 대한 냉각수 침입

(ㄷ) 침입한 냉각수의 기화, 팽창 및 연료파괴 또한 액적 주위 증기막의 불안정성이 냉각수의 연료내 침입을 유도할 수도 있다. 증기막이 천이비등 영역에서 혹은 외부적 충격에 의해 붕괴될 경우 증기/냉각수 경계면에 냉각수 제트가 발달하여 연료 내부에 침입한다는 것이다. 그러나 이러한 기구에 대한 실험적 증명은 아직 부족하다.

이 외에 내부가압화의 개념을 수용한 모델로는 냉각에 의한 가스방출 모델⁽¹⁶⁾과 외부 충격에 의한 가스방출 모델⁽¹⁷⁾이 있다. 이들은 모두 용융상태의 연료내부에 존재하는 용해가스가 급격한 연료의 냉각에 따른 초포화(super-saturation)의 영향이나 외부충격에 의해 팽창하여 연료를 파괴시킨다는 주장이다.

(iii) 응고의 영향

이상의 연료파괴 기구들은 상호작용 과정이 연료가 용융상태일 때 발생하는 것으로 전제하고 있다. 그러나 연료가 냉각수내에서 냉각될 경우 연료는 결국 응고된다. 신속한 연료의 응고는 열응력을 유발하며 만약 열 응력이 연료의 항복응력보다 크면 연료는 파괴될 수 있을 것이다⁽¹⁸⁾. 응고과정 초기에 응고 표면 내부의 연료는 용융상태로써 낮은 압축성에 의해 내부 가압화를 유도하여 응고된 부분의 응력을 더욱 높이고 경우에 따라 용융상태의 연료 일부는 응고된 표면의 크랙을 통해 연료제트로써 냉각수에 노출되어 연료의 응고과정을 가속화시킬 것이다. 구형 액적이 응고될 경우 응력의 분포는 접선응력이 법선응력보다 훨씬 크며 연료의 항복응력이 온도의 함수임을 감안할 때 연료의 파괴는 연료의 표면에서 응고의 시작과 동시에 형성될 것으로 고려된다.

응고의 영향은 물-알루미늄, 물-구리 계에 대한 유효한 연료파괴의 원리로 실험적으로 확인되었다. 그러나 그 이외의 물질 계에 대한 응고의 영향은 거의 배제되고 있다.

이 외에도 연료의 파괴에 대한 가설은 수없이 많이 제시되고 있다. 그러나 이상에서 제시된 영향 중 어느 하나만이 소규모 증기폭발의 전 과정을 지배할 수는 없을 것이다. 그 보다는 여러 영향들이 공동으로 에너지 전달의 각 과정에 대해 서로 그 영향을 미치면서 연료-냉각수 상호작용을 유도할 것으로 이해되어야 할 것이다.

(2) 기동기구(triggering mechanisms)

기동이란 연료의 파괴를 유도하는 소규모 현상을 의미한다. 기동의 요구도는 연료-냉각수 계의 안정성과 직접적으로 연관된다. 즉 계가 안정된 상태일 때 강한 기동이 필요할 것이며 상대적으로 불안한 계의 경우 상호작용은 약한 기동에 의해 혹은 자연적으로 발생할 수 있을 것이다. 따라서 기동기구에 대한 이해는 증기폭발을 미연에 방지할 수 있는 방법의 연구에 필수적이다.

기동의 분야는 아래와 같이 나뉘질 수 있다.

- 냉각수의 기화에 의한 기동
- 연료와 냉각수 간의 기계적 작용에 의한 기동
- 용융금속과 저온액체 간의 화학적 반응에 의한 기동

냉각수의 기화는 증기막의 형성으로 이루어지며 안정된 증기막은 연료와 냉각수를 분리시켜 증기폭발을 지연시키는 역할을 한다. 그러나 기포의 성장 및 붕괴, 또는 증기막의 주기적인 팽창 및 붕괴는 압력 변동과 함께 계를 불안정된 상태로 유도하여 기동을 용이하게 한다.

연료와 냉각수가 높은 운동에너지로 충돌할 때 혹은 연료가 주위 구조물과 부딪힐 경우 이는 기동에너지로써 상호작용을 초래한다.

만약 용융상태의 금속이 액체와 접촉할 때 반응성 가스가 생성된다면 기동에 필요한 계의 압력 변동을 일으킬 수 있으나 경우에 따라 증기폭발의 폭발성을 도리어 감소시키는 역할도 할 것이다.

3.3 폭발전파 및 팽창

FITS(Fully Instrumented Test Series)라고 명명된 대규모 증기폭발 실험에서는 2~20kg의 용융상태의 Al-Fe₂O₃ 혹은 Corium을 밀폐형 압력용기내의 물에 주입시켜 자연폭발을 유도하였다⁽¹¹⁾. 주입된 연료는 냉각수와 거칠게 혼합한 후 연료가 수조의 저부 가까이 도달했을 때 국부적인 폭발과 함께 증기폭발은 전 영역으로 확산되었다. 증기폭발의 전파 속도는 200~600m/s이며 변환율은 10~20%로 밝혀졌다.

실험에서 관찰된 주요사항은 다음과 같다.

- (1) 대규모 증기폭발은 화학폭발(chemical detonations)과 유사한 구조를 가진다.
- (2) 증기폭발시의 수조 저부에서 측정된 압력은 그림 4에 주어진 것과 같이 초기에 매우 큰 값을 가지지만 압력파의 전파와 더불어 급격히 감소한다.
- (3) 외부압력이 1.0MPa 이상의 고압으로 유

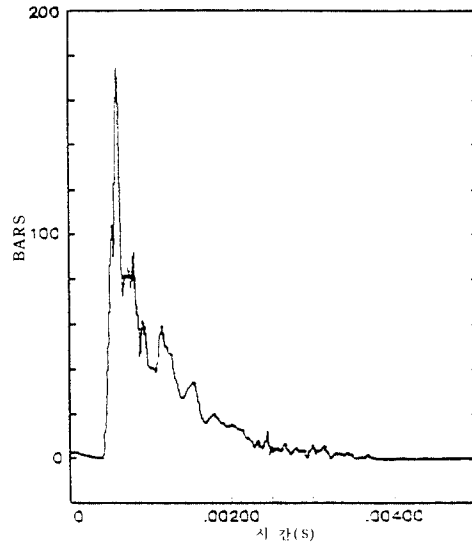


그림 4 FITS 실험에서 측정된 대표적인 수조 저부 압력

지될 때 증기폭발의 자연발생은 억제되지만 외부기동(external triggering)에 의해 유도될 수 있다.

(1) 폭발 전파 및 팽창 기구

대규모 증기폭발에 대한 이론적 연구는 폭발과정의 복잡성에 의해 해석상 큰 문제점을 갖고 있지만 자연핵생성이론과 열폭발이론으로 대별된다.

(가) 자연핵생성 이론

자연핵생성 이론은 연료-냉각수 혼합과정에서 설명된 바와 같이 균일핵생성의 개념을 용해되지 않는 이중액체 사이의 접촉면에 대해 적용한 것으로서 이 온도에서 생성되는 기포핵은 초기의 높은 내부압력에 의해 급속히 성장하여 외부로 충격파를 보내게 된다. 자연핵생성의 개념은 연료와 냉각수가 접촉할 때 발생하는 폭발적인 증기생성의 원리로 고려되고 있으며, 기포핵 생성율은 냉각수 단위 체적, 단위 시간에 대하여 다음 식으로 주어진다.

$$J = A(T) N \exp(-W_{eq}/KT) \quad (9)$$

여기서 $A(T)$ 는 주어진 온도에서 액체 분자

간의 충돌 회수, N 은 단위체적에 존재하는 분자수에 상당하는 상수, 그리고 K 는 볼츠만 상수이며 평형상태의 가역일, W_{eq} 는

$$W_{eq} = \frac{16 \pi \sigma^3}{3(\rho_v - \rho_c)^2} \quad (10)$$

로 계산된다. 이는 연료-냉각수 경계면의 온도가 자연핵생성 온도보다 높을 경우에 한해서 증기폭발은 가능하다는 이론이며 증기폭발의 과정을 설명하는 것이 아니라 증기폭발이 발생하기 위한 초기조건을 제시하고 있다.

(나) 열폭발(thermal detonations)이론

증기폭발의 전파 및 발달과정은 화학폭발(chemical detonations)의 경우와 유사하다는 것이 실험적 관찰로부터 제시되었다.⁽¹⁹⁾ 즉 증기폭발은 연료-냉각수 혼합물의 공간상에서 전파되는 충격파의 후단에 위치한 연료의 파괴과정과 미세 혼합과정에 의해 지배된다는 것이며 증기폭발의 전파과정은 연료-냉각수의 혼합영역에 화학폭발의 개념을 도입하여 해석할 수 있다. 그림 5에 주어진 것과 같이 충격파 후단에 위치한 연료는 냉각수와의 상대속도에 의한 유체역학적 불안정성에 의해 더욱 작은 입자로 파괴되고 이에 의한 냉각수의 기화 및 계의 가압화는 충격파의 강도를 더욱 높혀 증기폭발과정은 연료-냉각수 혼합물의 전영역으로 전파된다.

열폭발이론은 증기폭발 과정에 대한 개념적인 시나리오를 제공하여 모델화에 크게 기여하였지만 초기의 연료-냉각수 사이의 에너지 전달과정, 증기폭발의 기동 그리고 충격파에 의한

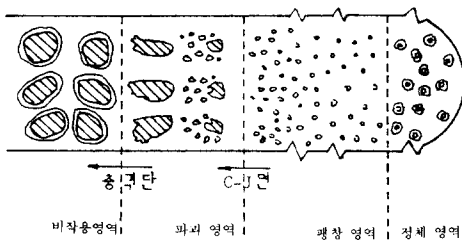


그림 5 열폭발 이론의 개략적 도시

연료 파괴과정등의 미시적 기구에 대한 해석이 결여된 거시적 모델이다.

열폭발이론은 폭발적 증기 생산의 기구 측면에서 자연핵생성이론과 상반된다. 그러나 이 두 모델은 증기폭발의 해석에 서로 배제될 수 없으며 한 모델의 결점을 상호보완하는 것으로 이해되어야 한다. 즉 자연핵생성 이론은 폭발기동과 발달과정에 적용될 수 있으며 반면에 열폭발이론은 이에 의한 전파과정의 해석에 적합하다.

(2) 증기폭발의 폭발성

증기폭발의 전파 및 폭발과정에 대한 모델화는 재해 잠재력인 폭발성에 대한 해석을 그 주요 목적으로 한다. 증기폭발의 폭발성은 열역학적 모델(thermodynamic model), 기계적 전파 모델(mechanistic propagation model) 등으로 부터 구해질 수 있다.

(가) 열역학적 모델

열역학적 모델은 연료와 냉각수의 혼합 및 파괴 과정에 대한 아무런 구속조건없이 상호작용에 참가하는 연료와 냉각수의 열용량만을 고려하여 연료-냉각수 계가 열적 평형상태를 이룬 후 팽창하는 경우를 해석하고 있다.⁽²⁰⁾ 따라서 증기폭발의 전과정은 2단계로 구성되며 첫째 단계의 혼합물의 열적 평형온도는

$$T_e = \frac{m_c C_{pc} T_c + m_v C_{pv} T_v + m_f C_{pf} T_f}{m_c C_{pc} + m_v C_{pv} + m_f C_{pf}} \quad (11)$$

로 주어진다. 두번째 단계에서 연료-냉각수-증기 혼합물이 가역단열 팽창할 경우 이는 연료나 냉각수의 운동에너지와 위치에너지 그리고 혼합물의 유동에너지로써 변환될 것이며 증기폭발에 의한 계의 잠재일은 이들의 합으로

$$\Delta W_{sys} = \Delta KE + \Delta PE + P_o (\Delta V)_{sys} \quad (12)$$

이며 P_o 는 주위압력이다. 주위 구조물의 손상에 직접 작용하는 인자는 혼합물의 운동에너지이나 열역학적 해석을 통해 이를 구분하는 것은 불가능하다. 따라서 이 모델은 폭발성의 상한치를 제시하는 것으로 고려되며 계산의 결과

는 30~40%의 변환율을 보여주고 있다.

(나) 기계적 전파 모델

열역학적 모델은 열전달율, 연료의 파괴율 등에 대한 과도적 특성을 포함하지 않으므로 계의 최대압력이나 그 변화 과정을 엄밀히 해석할 수 없다. 대부분의 경우 폭발재해의 심각성이 발생 최대압력의 함수임을 고려할 때 폭발과정의 과도적 해석은 안전성 해석의 요건임을 알 수 있다. 그러나 기동기구와 연료의 파괴과정이 명백히 밝혀지지 않은 상태에서 이를 정확히 구하는 것은 불가능하며 단순화된 일차원 모델에 정성적인 연료파괴율을 도입한 기계적 전파모델이 제시되었다.⁽²¹⁾ 냉각수 제트의 연료내 침입에 의한 연료의 점진적 파괴과정은

$$\frac{dm_{fr}}{dt} = \frac{\rho_f N_{mix} \pi D_f^2 U_{frag,0}}{3} \exp(-2U_{frag,0}t/D_f) \quad (13)$$

로 주어져 폭발의 전파과정을 대신하며 여기서 N_{mix} 는 혼합영역내의 연료액적의 수, $U_{frag,0}$ 는 연료의 초기 파괴속도로써 다음과 같다.

$$U_{frag,0} = \left[\frac{P - P_0}{\rho_c \{1 + (\rho_f/\rho_c)^{1/2}\}} \right]^{1/2} \quad (14)$$

기계적 전파모델로 부터 계산된 변환율은 5~15%로써 열역학적 모델의 경우보다 실측치에 가까운 값을 보여주고 있다.

4. 맺음말

증기폭발현상에 대한 기존의 연구내용들이 개괄적으로 소개되었다. 지난 30여년간 대규모 및 소규모 증기폭발에 대해 수많은 이론 및 실험적 연구가 진행되어 왔으나 아직 많은 과제들이 미해결의 상태로 남아있다. 이들은

- (1) 연료-냉각수 접촉양식의 영향
- (2) 초기 혼합과정에 대한 에너지 전달 및 유동해석
- (3) 연료파괴 과정에 대한 정량적 해석
- (4) 폭발과정의 전파에 대한 제인자의 영향
- (5) 팽창과정 중 슬러그(slug)의 영향

등이며 현상 자체의 난이성과 위험성에 비추어 볼 때 해석에 많은 문제점을 안고 있다. 그러나 과학적인 호기심과 더불어 산업재해 방지 및 현상의 생산적 이용이라는 최종목표에 도달하기 위해서는 체계적으로 집중적인 연구가 꾸준히 계속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) R. Miller et al., 1964, "Report of the SPERT I Destructive Test Program", USAEC Report No. IDO-16883.
- (2) G. Long, 1957, "Explosions of Molten Aluminum in Water: Cause and Prevention", Metal Progress, 71, pp. 107~112.
- (3) H. Tetzener, 1959, "Slag Explosions in Open-Hearth Steelworks", Neve Hutte, Vol. 4, No. 6, p. 352.
- (4) W. Nelson, E.H. Kennedy, 1956, "What Causes Kraft Dissolving Tank Explosions", Paper Trade Journal, Vol. 140, No. 29, pp. 50~56 and Vol. 140, No. 30, pp. 30~32.
- (5) T. Enger, D. Hartmen, 1972, "Rapid Phase Transformation during LNG Spillage on Water", Proc. of the 3rd Conf. on Liquefied Natural Gas, Washington, D.C., Sept.
- (6) S.A. Colgate, T. Sigurgeirsson, 1973, "Dynamic Mixing of Water and Lava", Nature 244, pp. 552~555.
- (7) H.K. Fauske, 1972, "The Role of Nucleation in Vapor Explosions," Transactions of American Nuclear Society, 15, pp. 813~814.
- (8) D.H. Cho, H.K. Fauske, M.A. Grolmes, 1976, "Some Aspects of Large-Mass Energetic Fuel-Coolant Interactions", ANL/RAS 76~35.
- (9) R.E. Henry, H.K. Fauske, 1981, "Required Initial Conditions for Energetic Steam Explosions", ASME HTD-V19, Washington.,

- DC.
- (10) T.G. Theofanous, M. Saito, 1982, "An Assessment of Class-9(Core-Melt) Accident for PWR Dry Containment Systems", Nuclear Engineering and Design, 66, p. 307.
- (11) D.E. Mitchell, M.L. Corradini, W.W. Tarbell, 1981, "Intermediate Scale Steam Explosion Phenomena: Experiments and Analysis", SAND81-0124, SNL.
- (12) L.S. Nelson, P.M. Duda, 1981, "Steam Explosion Experiments with Single Drops of Iron Oxide Melted with CO₂ Laser", Sandia Laboratories, SAND81-1345, NUREG/CR-2295.
- (13) J. Schriewer, "On the Theory of Hydrodynamic Fragmentation of Liquid Drops in Liquid Media by Means of Shockwaves with Application to Systems Hg-H₂O, Fe/H₂O, Steel/Sodium, UO₂/Na", Dissertation, Institute for Nuclear Energy System, University of Stuttgart.
- (14) D. Swift, L. Baker, 1965, Reactor Development Progress Report, ANL-7152, January, 1965, pp. 87~96.
- (15) H. Schins, 1973, "The Consistent Boiling Model for Fragmentation in Mild Thermal Interaction-Boundary Conditions", EUR-ATOM Report: EUR/CIS/699/73e.
- (16) M. Epstein, 1975, "Thermal Fragmentation-A Gas Release Phenomena", Nuclear Science and Engineering, 55, p. 462~467.
- (17) L.D. Buxton, L.S. Nelson, 1977, "Impulse Initiated Gas Release-A Possible Trigger for Vapor Explosion", Transactions of the American Nuclear Society, 26, p. 398.
- (18) W. Zyszkowski, 1976, "Thermal Interactions of Molten Copper and Water", International Journal of Heat and Mass Transfer, 18, pp. 625~633.
- (19) S.J. Board, R.W. Hall, 1974, "Propagation of Thermal Explosions: 2 Theoretical Model", CEGB, CEGB Report RD/B/n 3249.
- (20) E.P. Hicks, D.C. Menzies, 1965, "Theoretical Studies on the Fast Reactor Maximum Accidents", Proc. of Conf. on Safety, Fuels, Core Design in Large Fast Power Reactors, ANL-7129.
- (21) M. Oh, M.L. Corradini, 1985, "A Nonequilibrium Model for Large Scale Vapor Explosions", Proc. Third International Conference on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, Rhode Island.

