

原子炉에서

發生 가능한 蒸氣爆発

金 東 洙

(西独STUTTGAETI大)

I. 서론

원자로 내에서 발생 가능한 증기폭발에 대한 연구는 독일 연방연구 기술성(Bundesministerium für Forschung und Technologie)이 계획 착수한 “독일 원자력 발전소의 위험성 연구”(Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke)를 통하여 비로서 독일에서 본격화되었다.

이 사업의 주 목적은 원자력 발전소에서 고장 또는 사고로 인하여 발생 가능한 모든 위험성들을 가설정 한후, 그 원인이나 진행과정의 유사성별로 구분되어진 Project를 집중적인 실험 및 이론적 연구를 통하여 분석하는데 있다.

미국의 원자로 안전도 연구“WASH-1,400”을 모범으로 응용하고 있는 전기사업의 한 프로젝트가 증기 폭발에 대한 연구이다.

II. 증기폭발(Vapor Explosion)

일반적으로 증기폭발은 극단적인 온도차가 있는 두 액체가 접촉할때 신속한 혼합과 열전달과정에서 오는 결과이다.

여기서 두 액체의 접촉표면적은 고온 액체의 파쇄(Fragmentation)에 의해 순식간에 증대되며 저온 액체의 비등온도가 고온 액체의 비등온도보다 낮음으로 인해서 대량의 저온 액체가 극단 시간(< 2 ms)내에 증발하며 고 증기압이 생성된다.

화학 반응을 일체 고려치 않은 이 극단 시간내에 순수한 물리적 반응을 통해 생성되는 고 증기압을 증기 폭발이라 한다.

이러한 폭발사고는 실제로 여러 산업 부류에서 발생했으며 그 대표적인 예를 표1에 요약하였다.

핵 반응로에서 발생한 사고들은 비록 실험용 반응로에서 발생했지만 실제로 전력 생산을 위해 가동되고 있는 핵 발전소에서도 역시 발생가능하다는 가정의 동기가 되었다. 특히 SL-1반응로 사고는 증기폭발 연구를 위한 대표적인 예로 거론되고 있다.

원자로에서 발생 가능한 증기폭발 연구의 목적은 우선 이론적으로 증기폭발을 설명하고, 최

〈表 1〉

산업부문	회 사 명 반 응 로 명	국 가	소 제 지	때	내 용	결 과
철강공장	Reynolds Metal Company	미 국	Illinois	58. 2. 19	수분 함유량이 높은 고물 금속 용해 과정에서 발생	사망 6명 부상 40명
	Quebec 주물공장	캐나다	Quebec		45kg의 용해 철물이 300ℓ 이 물이 들어있는 통에 추락	사망 1명
	Siemens- Martin 제철공장	동 독		1956	Slag의 냉각도중 즉시 증발할 수 있는 양보다 많은 양의 물을 냉각제로 사용했음.	사망 1명 부상 6명
제지공장					소규모이나 철강공장에서 보다 빈번한 발생률을 보이고 있으며 찻물과 용해된 종이와의 혼합과정에서 흔히 발생	
핵반응로	NRX 반 응 로	캐나다	Ontario	52. 12. 12	40MW의 열공률을 소유한 연구용 반응로며 운전실수로 약 2000MWS의 열에너지 발생으로 알루미늄 피복체가 용해되어 냉각제와 접촉	반응로 일부의파손
	Borax 1 반 응 로	미 국	Ohio	54. 7. 22	1.2MW의 실험용 반응로 고의적인 에너지폭산에서 예상이상의 압력이 증기폭발로 생성	반응로완파
	SL-1 반 응 로	미 국	Idaho	61. 1. 3	3 MW의 반응로가 순간적인 공률 상승을 보여 130MWS의 에너지가 냉각제로 전달됨. 4초 내에 이루어진 사고로서 현재 원자로 내에서 발생 가능한 증기폭발 연구의 표본으로 적용됨.	사망 3명 반응로의 90% 파손

악의 경우 생성되는 최고 증기압을 추정하고, 이 압력이 원자로와 콘테인먼트에(Coutainment)가 할수 있는 손상의 정도를 파악하며, 증기폭발을 지연 또는 가속하는 원자로내의 조건들을 파악하는 것이다.

주로 경수 반응로(Light Water Reactor)에서 발생 가능한 가정적 증기 폭발의 발생 과정을 4 단계로 구분하여 그림 1에 묘사했다.

LWR에서의 가정적 증기폭발은 우선 주냉각 시스템의 파손에 의한 냉각제 상실 사고(Loss-of-coolant Occident)를 전제한다. 고압하의 주냉각 시스템 파손으로 원자로 내의 냉각제가 원자로 외부로 유출되며 불충분한 냉각, 잔재열과 붕괴열로 인해 핵연료의 온도가 상승한다.

이때 가능한 피복제(Zircaloy)와 냉각제의 발열적 화학반응($Zr + ZH_2O \rightarrow ZrO_2 + ZH_2$)은 온도 상승을 가속한다.

핵 연료가 용해온도까지 도달하면 피복제의 변형과 곧 이은 파손으로 핵연료 용해물이 유출 가능하며, 대개는 핵연료 붕을 지탱하는 격자판이 파괴되어 용해물이 유출되어 원자로내에 잔재하는 냉각제와 혼합된다.

이 과정 이후 증기폭발(4)이 가능하며 증기폭발을 고려치 않을시 용해물이 원자로 바닥을 뚫고 기초 콘크리트를 공격하는 사고(4')가 발생 가능하다.

증기 폭발이 발생하는데 필요한 조건들로서 다음을 들 수 있다.

- 1) 용해물로부터 냉각제로의 열전달 면적이 커야하며 이를 충족시키기 위해 용해물은 아주 작은 파편으로 분쇄되어야 한다.
- 2) 파쇄된 용해물은 단시간 내에 균일하게 냉각제 내에 분산되어야 하며, 이는 용해물과 냉각제의 동시 직접 반응을 위한 조건이

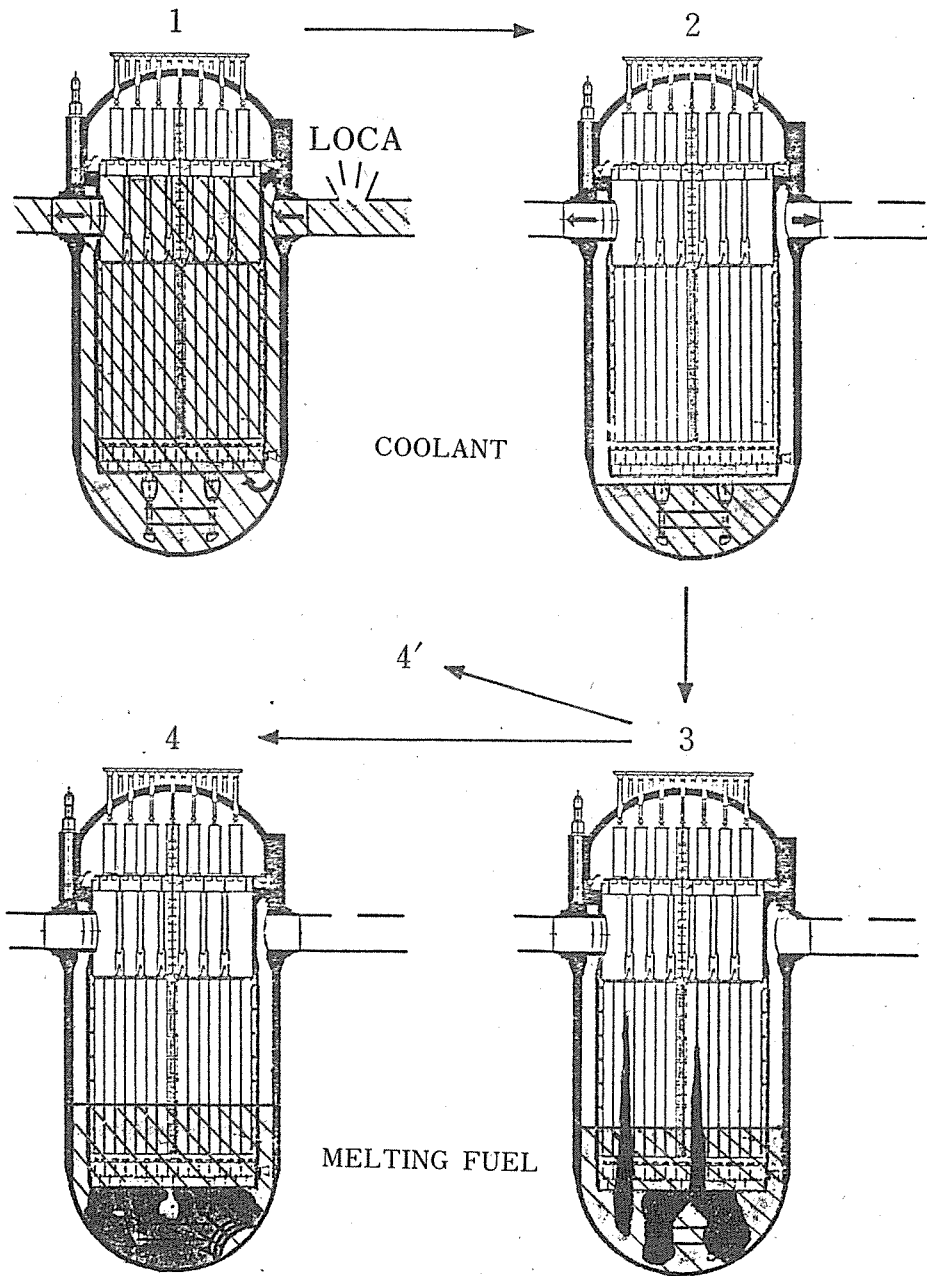


Fig.1.: Schematic process of a hypothetical vapor explosion in LWR

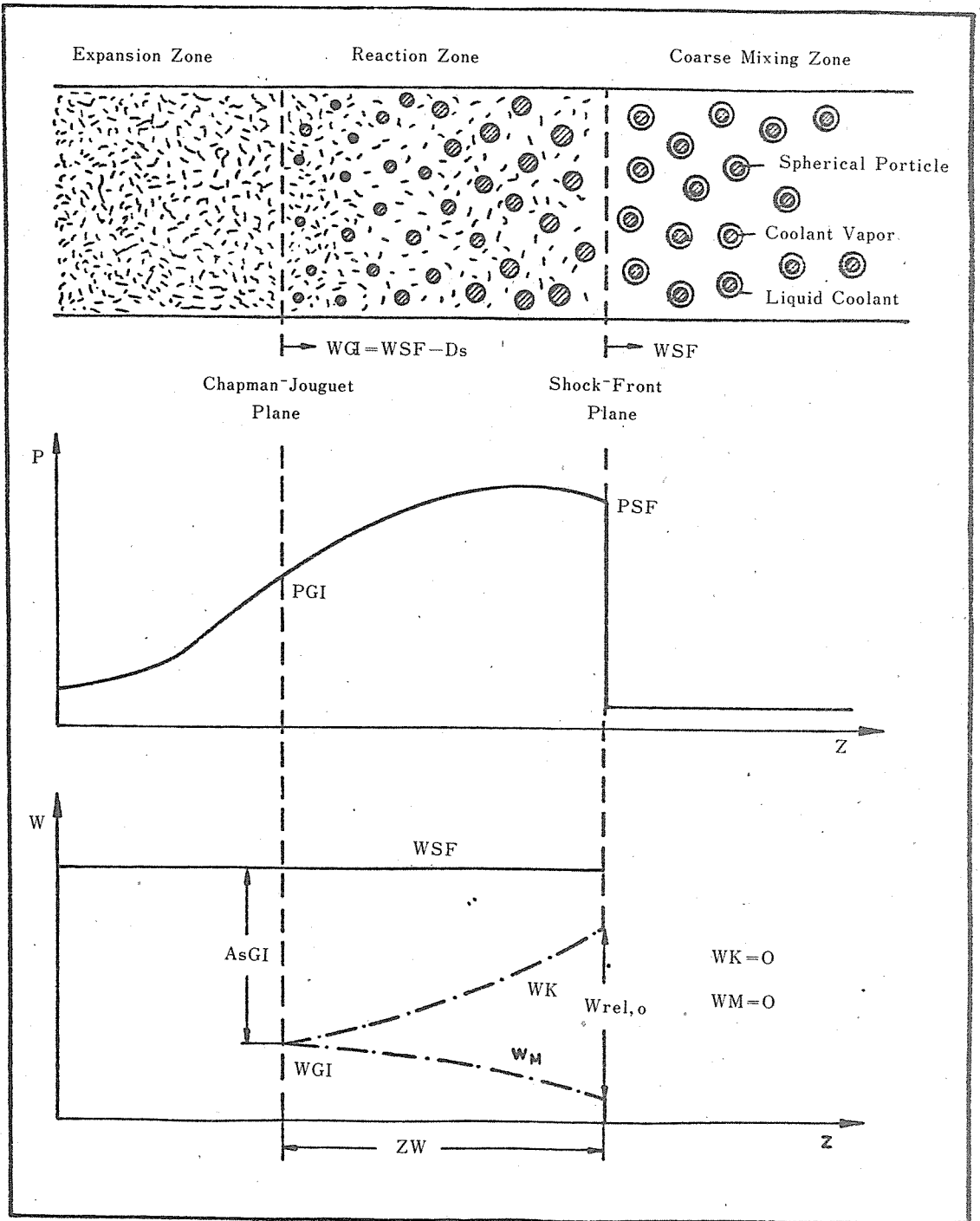


Fig. 2: QUALITATIVE DESCRIPTION OF A THERMAL DETONATION

다.

3) 충분한 열 전달의 보장을 위해 대량의 용해 물이 냉각제와 혼합되어야 한다.

증기폭발이 과학적 분석을 위해서는 우선 그 진행과정을 상기 발생가정조건을 전제로 모델화해야 한다.

그림 2는 대표적 증기폭발 모델을 보여준다. 용해된 구형의 핵연료가 피막비등(Film Boiling) 하여서 냉각제와 대충 섞인다. 증기폭발이 충격파(Shock Wave)의 작용아래 시작된다. 이 모델에서는 불변의(Steady State) 충격파를 가정하며 이런 충격파는 핵연료 용해시 추락한 용해물과 원자로 벽에 포위된 냉각제의 순간적인 기화에 의해 가능하다(Entrapment). 충격파의 작용으로 이미 용해물을 둘러싸고 있는 안정한 증기막(Vapor Film)이 붕괴되고 고온의 용해물 표면이 냉각제와 직접 반응하며 용해물의 파쇄가 이루어진다.

이 파쇄로 인한 열 전달 면적의 증대는 신속한 증기압의 상승을 초래하며 이어서 팽창된다. 팽창되는 고압은 파괴력을 지니며 동시에 다른 증기폭발의 발동 메카니즘으로 작용한다.

증기 폭발의 과정을 일차원적으로 분석하는 이 모델의 특징으로는 충격파의 전선과 Chapman-Jouguet선을 경계로 하는 팽창, 반응 그리고 혼성지대의 구분이다.

증기폭발을 합당하게 설명하기 위해서는 반응 지대에 대한 정확한 연구가 절대적으로 필요하다. 용해물이 파쇄되는 이 반응지대에 대한 미흡한 분석은 증기폭발 모델에서 얻어지는 결과에 막대한 영향을 줄 수 있다.

그의 중요성에 비교되는 이론적 실험적 연구가 진행 중이다.

III. 용해물의 파쇄 메카니즘(Fragmentation Mechanism)

용해물의 파쇄 메카니즘은 이론적으로 열역학과 유체역학의 도움으로 해석 가능하다.

유체 역학에 근거를 두는 이론들은 파쇄의 원인이 충격과 전선 후면에 두 액체의 밀도차에 의해 성립되는 상대 속도의 차에서 온다고 보며

열 역학에 근거를 두는 이론들은 다종의 비등과정에서 생성되는 증기압이 파쇄의 원인이라 간주한다. 실제로는 두 학문에 근거를 두는 메카니즘들이 동시에 가능하지만 기초 이론의 성립을 위해 상기 이론들은 서로의 간섭을 무시하고 있으며 극단적인 가정이지만 구형인 단개의 용해물방울이(spherical single fluid drop) 냉각제에 존재한다고 본다.

파쇄 메카니즘 연구의 목적은 가정한 메카니즘이 짧은 파쇄시간($< 1ms$)내에 발생하며, 이 시간내에 용해물의 표면적이 초기 표면적의 200배 이상의 증가를 보이는지를 우선 파악한후 여기서 구해진 데이터가 증기폭발을 설명하는 모델에 적합한지를 시험하는 것이다.

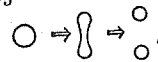
1. 유체 역학에 근거를 두는 파쇄 메카니즘

유체 역학에 근거를 두는 메카니즘은 열전달의 영향을 무시하며 기초 모델은 제트엔진 연구에서 진보를 보인 미소한 연료방울의 고속 유동 가스 속에서의 파쇄 메카니즘에서 유도되었다.

기본적 원리는 불변의 충격과 후면에 성립된

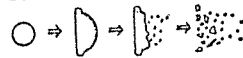
1) Schwingungszzerfall (vibrational mode)

$We=5$



2) Blasenzerfall (bag breakup mode)

$We=10$



3) Keulenzzerfall (claviform breakup mode)

$We=35$



4) Abstreifprozess (stripping mode)

$We=500$



5) Momentaner zerfall (catastrophic mode)

$We=25000$

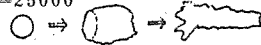
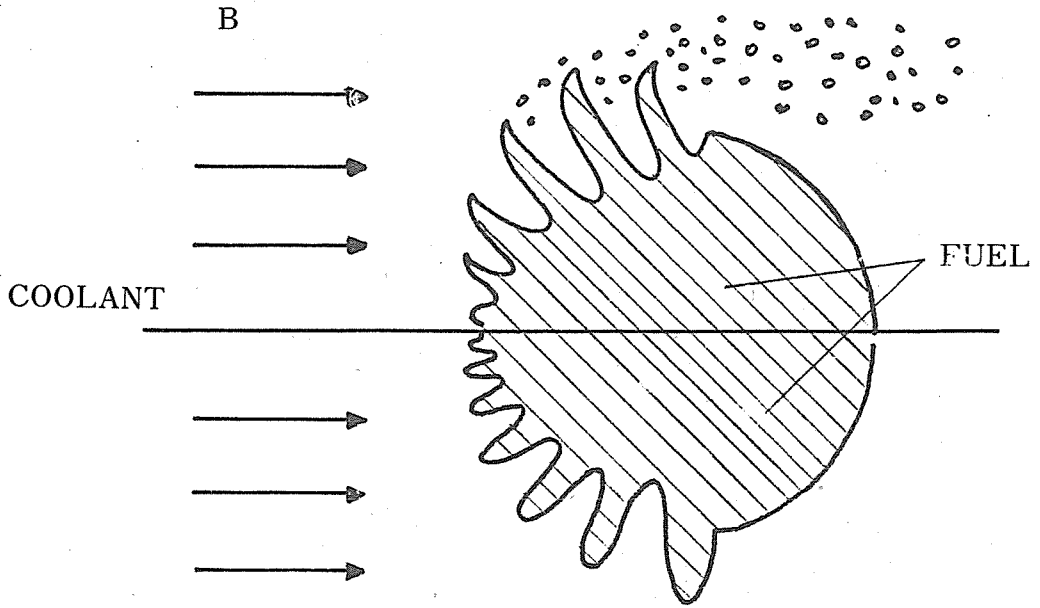


Fig. 3: Main forms of drop fragmentation after passing of a shock wave in air (Reinecke and Waldman)

는 속도장에서 발생하는 현상들에서 유도된다.
가. Critical Deformation에 의한 파쇄

이 모델의 원리는 충격과 전선 후면에 비대칭
적인 압력작용으로 구형의 용해물방울이 타원체



A Fig. 4: Schematic principle of the capillary wave model (a) and the stripping (b)

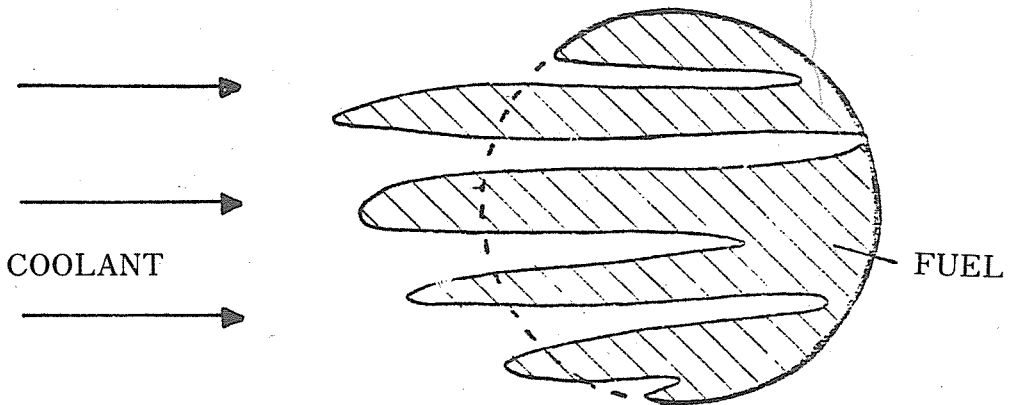


Fig. 5: Taylor-Instability

면으로 변형되며 지속되는 압력이 용해물의 표면 장력을 증가할때 최소 표면 에너지 원칙에 의해 변형된 용해물의 파쇄가 발생한다는 것이다. 충격과 후면에 유도되는 냉각제의 유동속도에 따라 다형의 메카니즘이 가능하다.

그림 3에 We-넘버 ($We = \frac{SDV^2}{\sigma}$, S, D=액체방울의 밀도 및 직경, V=주위 액체의 속도, σ =표면장력)별로 구분되어진 유동 공기속에서의 액체방울 파쇄가 설명되어 있다.

나. 불안정한 두액체 접촉면의 파동(Unstable Boundary Wave)에 의한 파쇄

두 액체의 접촉면에 발생하는 파동의 안정성 판단에는 파동의 원 진동수 ω 와 파동수K(Wave Number)의 분산관계(Dispersion Relation) 공식이 이용된다.

$$f(\omega, K) = 0$$

점성(Viscosity)를 무시할때 이 분산 관계 공식은

$$\omega = K \frac{SoVo + S\infty V\infty}{So + S\infty} \pm \sqrt{kg \frac{So - S\infty}{So + S\infty} + \frac{\sigma K^3}{So + S\infty} - \frac{K^2 So S\infty}{(So + S\infty)^2} (Vo - V\infty)^2}$$

ω : 원진동수 K : Wave Number
 g : 중력 σ : 표면장력 S : 밀도
 V : 속도 o : 용해물 ∞ : 냉각제

이러 루트 값이 마이너스일때 접촉면 파동은 불안정하다.

루트 내의 한 부분이 다른 부분보다의 우세여 하에 따라 다음과 같이 구별할 수 있다.

1) 모세파동(Capillary Wave)에 의한 파쇄

$$\text{모세파동은 } K^2 \gg \frac{(So - S\infty)g}{\sigma} \text{ 일때 존재하며,}$$

안정을 도모하는 표면 장력 σ 가 불안정을 초래하는 상대속도 $(Vo - V\infty)$ 보다 열세일때 불안정하다.

그림 4a는 구형인 용해 물방울의 동점(Stagnation point)에서 발생한 불안정한 모세 파동이

적도로 진행하면서 그의 진폭이(3)성장하는 과정을 이론적으로 보여준다. 파쇄는 증가된 진폭이 예를 들어서 용해물 방울의 직경에 도달할때 이루어진다.

그림 4b는 발전된 이론으로 증가된 진폭이 적도 근처에서 외부 냉각제의 유동에 휩쓸린다는 것이다. (Capillary Wave Stripping).

2) 테일러 불안전성(Taylor Instability)에 의한 파쇄

$$kg \frac{So - S\infty}{So + S\infty} \text{ 이 루트내의 다른 부분보다 우세}$$

하고 마이너스 근을 지날때 테일러 불안전성이 유발된다.

즉 고밀도와 저밀도의 두액체가 접면하고 있을때 저밀도의 액체로부터 고밀도의 액체로, 그리고 접면에 수직으로 가속도가 작용할때 발생하는 Taylor-Wave의 불안정성은 그림5에 간략히 묘사되어 있다.

파쇄는 Taylor파동의 진폭이 시간이 경과함에 따라 성장하여 용해물방울의 직경보다 클때 일어난다고 간주한다.

2. 열 역학에 근거를 두는 파쇄 메카니즘

가. 증기포의 붕괴(Vapor Bubble Collapse)에 의한 파쇄

이 모델은 고온의 용해물이 저온의 냉각제와 접촉시에 기포비동의(Bubble Boiling) 발생을 전제로한다. 초기에 용해물 표면에 발생된 미소

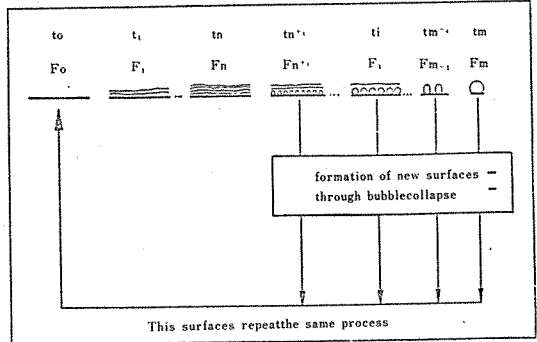


Fig. 6: Schematic illustration of the bubble collapse model

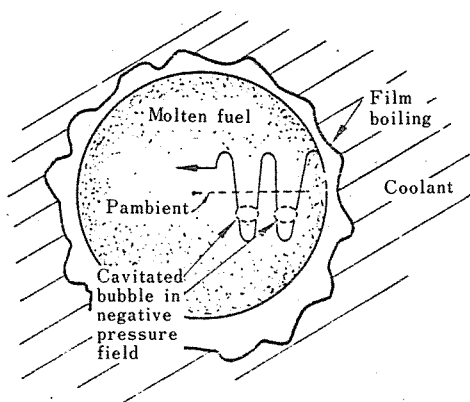


Fig. 7: Descriptive Illustration of the Acoustic Cavitation Model for Fragmentation

한 기포들은 최대 가능한 크기로 성장한후 붕괴된다.

이 붕괴과정에서 생산되는 역학적 힘은 용해물의 파쇄를 야기한다. 파쇄된 파편과 냉각제와의 접촉면에서 상기와정이 반복되는 이 모델은 그림 6에 간략히 설명되어 있다.

나. 용해물 내의 캐비테이션 진동에 (Cavitation Oscillation)의한 파쇄

이 모델의 전제조건은 용해물 주위에 존재하는 피막비등 (Film Boiling)이다. 증기막의 성장과 붕괴에서 발생하는 압력진동은 용해물의 내부에까지 영향을 미치게 된다.

만약 내부로 전달된 압력이 포화압력 이하이면 용해물의 증기가 내부에 발생하며 이 증기는 곧이어 다음 압력 상승에서 순간적으로 액화된다. 이런 과정의 반복을 통하여 발생하는 캐비테이션 진동이 파쇄의 원인으로 간주되는 이 모델의 간략한 묘사는 그림 7에서 볼 수 있다.

3. 파쇄 메카니즘의 실험적 연구

유체역학이나 열역학에 근거를 두는 이론적 파쇄 메카니즘들은 상기에 서술한 대표적인 예 외에도 다수가 존재하나 이를 실험적으로 입증하는 예는 극히 드물다.

유체역학에 근거를 두는 메카니즘을 증명하기

위한 실험결과로서 테일러 불안정성을 주장하는 121와 Stripping을 주장하는 131이 있으나 불선명한 사진들은 확고한 입증물로는 불충분하다. 열전달 영향을 고려치 않기 위해 냉각제로 물을 그리고 용해물로 수은등을 사용하는 이런 실험들은 물의 압축률 때문에 불변의 충격과를 생산하기 어렵고 단시간내에 이루어지는 파쇄현상을 관찰하기 위해 고속 카메라와 그에 필요한 고급 장비를 필요로 한다. 수중에서 충격과를 생산하기 위한 한 방법으로 수중철사 폭발을 들 수 있는데 이 방법에 의한 실험이 본인이 근무하는 연구소에서 진행중이다. 수중 철사폭발의 이론적 설명은 그림 8에서 볼 수 있다.

열 역학에 근거를 두는 메카니즘의 실험적 입증에서는 고온의 용해물 방울이 냉각제 (물)와 접촉함과 동시에 안정한 증기막 (Vapor Film)이 용해물을 포위한다.

용해물 표면과 냉각제와의 직접반응을 위해 이 증기막은 대개 충격과를 사용하여 붕괴시키는데 이로 인한 유체력의 파쇄에 미치는 영향과 약에 난점이 있다.

IV. 결 론

상기에 서술된 증기폭발이 실제로 핵 반응로에서 발생한 가능성은 극히 적다. 특히 발생조건들이 핵연료 용해 사고시 동시에 성립된다는 것은 순수한 가정에 불과하지만, 계속되고 있는 연구의 목적은 우선 핵 반응로 뚜껑과 바닥이 증기폭발에서 발생하는 증기압을 지탱할 수 있는지를 파악하는 것이고, 이미 존재하는 기초 과학을 응용하여 이런 가정적 사고의 과정을 과학적으로 설명하는 것이다.

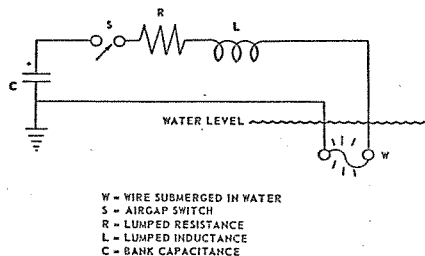


Fig. 8 : Schematic representation of discharging circuit