'97추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중대사고시 초음속연소 발생 평가 방법론 비교 연구

홍 성완, 박 수용, 김 희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 초음속연소 발생 기준에 대해 ABB-CE에서 System80+에 적용한 방법론과 W. Breitung 등이 최근 실험자료를 이용하여 제시한 방법론에 대한 모델의 특징을 비교.분석하였다. W. Breitung 등이 제시한 방법론을 이용한 격납건물내에서 존재할 수 있는 여러 격실크기에서 수소농도를 가정하여 초음속연소 가능성 평가 수행 및 초음속연소 발생 평가절차를 제시하였다.

1. 서 론

원전에서의 초음속연소 발생여부는 중대사고시 수소제어와 관련하여 매우 중요한 쟁점 중의 하나이다. 원전에서 수소제어를 위해 관련된 여러 분야의 연구가 병행되어야 하나 본 논문에서는 미국 규제요건인 10CFR50.34(f)의 초음속연소 관련 사항인 "격납건물내에 균일하게 분포된 수소농도는 핵연료피복재(Fuel-clad metal water reaction) 100% 산화에 상응하는 수소발생시 사고기간 동안이나 사고후에도 수소농도가 10% v/o를 넘지 말아야 하며(10CFR50.34(f)(2)(ix)(A)), 격납건물 건전성이나 격납건물내 사고완화계통의 상실을 유발시키는 예기치 않은 수소연소나 초음속연소가 발생하지 않도록 수소농도가 밀집되지 않아야 한다(10CFR50.34(f)(2)(ix)(B))"와 관련하여 초음속연소 발생기준에 대해 지금까지 개발된 방법론들을 조사.비교.평가하였다. 초음속연소는 현상이 매우 복잡하고 발생기준이 불확실하며, 다만 발전소의 규제요건과 관련하여 SNL에서 FLAME실험[1]을 통한 발생기준을 운전중인 발전소[2]와 CE-System 80+에 적용한바 있다[3]. 국내에서도 울진 3,4호기 및 차세대원전에서 중대사고시 초음속연소 발생 가능성에 대해 관심이 집중되고 있다. 본 논문에서는 FLAME 실험을 통한 방법론과 W. Breitung 등이 최근 대형 종합실험결과를 통해 제시한 방법론[4]의 비교.평가 및 초음속연소발생 평가 절차를 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 초음속연소 현상 발생기준

초음속연소는 고에너지의 폭발에 의해 직접적으로 발생하는 초음속연소와 아음속연소로 부터 초음속연소로 천이에 의해 발생하는 DDT(Deflagration to Detonation Transition)로 분류되며, 원전에서는 고폭발 에너지를 요하는 초음속연소 발생 가능성은 매우 희박하나, DDT는 점차 발생가

능성이 존재할 수 있다고 알려져 있다[5]. 1980년도 초반까지 DDT에 대한 연구는 작은 직경의 긴 튜브안에서의 실험연구로 진행되어 장애물이 없는 긴 튜브에서 DDT 발생기준은 대략 $\lambda/d < 1$ 라는 것이 밝혀졌으며, 화염이 전파하는 천이길이는 튜브직경보다 10배 이상이었다. 여기서 λ 는 초음속연소 격자폭, d는 튜브내경 또는 오리피스 직경이다. 한편, 채널모형을 가지고 대규모로 수행된 FLAME 실험과 소규모로 수행된 MINIFLAME 실험에서 기하학적 규모가 증가할 수록 DDT 가능성이 증가하며, 천이길이는 튜브가 아닌 채널(폭)의 경우 1-2 배 정도 감소한다는 것을 규명하였다. 이 경우 약 수소농도가 15 %v/o 이상에서 발생하였으며, DDT 발생과정에 장애물의 배열상태가 중요한 역할을 하였다. DDT 발생기준은 1950년도 후반까지 소규모의 둥근 긴 튜브의 실험으로 부터 수소농도가 18 %v/o 이상에서 관찰되었으나 1980년도 후반에는 실제 발전소의 축소형태에서 수행된 FLAME 실험에서 장애물이 있고 venting이 없는 경우 15% v/o에서 DDT가 관찰되었다. 최근 Dorofeev는 12.5 %v/o에서 DDT를 발생시키는데 성공하였으며[6], Shepard는 DDT에 대한 보수적 기준은 수소농도 10 %v/o 일 것이라고 하였다[7].

CE-System 80+에서 사용된 초음속연소 발생기준[2]은 FLAME실험을 토대로 M.P Shermann 등[1]이 제시한 방법으로 실제 발전소의 규제요건을 충족시키기 위해 사용된 바 있어 중요한 방법론이라 할 수 있다. 이 방법론은 Sherman and Berman DDT Ranking Scheme을 사용한 Semi-Quantitative 방법으로 혼합물의 반응도(고유 화염전파성)에 대해서는 초음속연소 격자폭(Detonation Cell Width)을, 화염가속에 대해서는 격납건물 내부 구조물의 배열상태(Containment Internal Configuration)를 사용하여 DDT 발생 여부를 판단한다. 분류절차는 첫 번째로 표 1의 기준에 따라 격납건물내 여러 영역에서 주어진 수소농도에 대해 고유화염전파성을 분류하고, 두 번째로는 표 2의 기준 따라 격납건물 각 영역을 기하학적 특성에 따라 분류하며, 마지막으로는 이들을 조합한 표 3과 비교하여 DDT 발생여부를 결정한다. 이 방법론은 고유화염전파성에 대한 기준은 분명하나, 상온, 대기압, 건조공기 상태에서만 적용할 수 있으며, 격납건물의 각 영역의 기하학적 특성 분류에 판단이 용이하지 않다.

W. Breitung 등이 제시한 초음소연소 발생기준[4]은 고유화염점파성(수소농도)과 발전소의 격실크기에 따른 DDT 발생 가능성을 분석하고 있다. 그림 1의 비균질성 크기(nonuniformity size)와 초음속연소 격자폭(detonation cell width)과의 관계로 부터 아래와 같은 상관식을 얻었다.

$$L=7\lambda \qquad \text{---------- (1)}$$

여기서 L은 아래와 같이 정의한다.

$$L = V^{1/3} \qquad \text{---------- (2)}$$

초음속연소 발생가능성을 평가절차는 다음과 같다. 첫째, 비균질성 크기를 결정한다. 하나의 격실을 균일농도를 나타낼 때는 식 (2)로, 하나의 격실을 여러개의 또다른 node로 나누어 해석할 때는 아래와 같이 계산한다.

$$L_n = V_n(t)^{1/3} \qquad \text{----------(3)}$$

여기서

$$V_n(t) = \sum_i \Delta V_{i,n}(t) \qquad \text{----------(4)}$$

$\Delta V_{i,n}(t)$: 계산 격실 n에서 i번째 cell에 대한 체적.

두 번째, 수소농도에 따른 평균 초음속연소 격자 폭을 얻는다. 초음속연소 격자 폭을 얻기 위해 등가비(Equivalence Ratio)는 다음과 같이 계산한다.

$$\Phi_n = 2.3866\, X_{H2,n}/(1 - X_{H2,n} - X_{H2O,n}) \qquad \text{----------(5)}$$

이때 격실 n에서 수소-공기-수증기 혼합물에서 수소농도 및 수증기농도는 아래와 같이 계산하며,

$$[\{X_{H2}(t)]_n = (\sum X_{H2,i} \cdot \Delta V_i)_n / V_n \qquad \text{----------(6)}$$

$$[\{X_{H2O}(t)]_n = (\sum X_{H2O,i} \cdot \Delta V_i)_n / V_n \qquad \text{----------(7)}$$

등가비는 초음소연소 격자폭과 그림 2와 같은 관계를 갖는다. 마지막으로 DDT 발생 가능성 평가는 아래의 index R을 도입하여 판단한다.

$$R_n(t) = \frac{L_n(t)}{7\,\lambda_n(t)} \qquad \text{----------(8)}$$

그림 1의 L=7λ 의 아래부분은 R > 1 로, 즉

$$\lambda_n(t) < \frac{L_n(t)}{7} \qquad \text{----------(9)}$$

인 경우 DDT 발생 가능성이 있다. 이 방법론은 최근에 수행된 대형실험 결과로 부터 더욱 타당성을 갖게 된다[8].

2.2 두 방법론의 특징 비교

두 방법론의 특징 비교를 위해 W. Breitung 등이 개발한 방법론을 사용하여 여러가지 수소농도 및 격실크기에서 초음속연소 발생 가능성을 평가하였다. 격실 체적이 1000 m^3이고, 수소농도가 15 %v/o, 수증기농도가 10 %v/o인 격실이 존재하는 경우 방정식 (2)로 부터 L=10m 이고, 방정식 (5)로 부터 Φ=0.4773이다. 이 Φ 값에 대해 그림 2로 부터 λ는 대략적으로 0.8 m이다. 따라서 λ가 L/7=1.43m 보다 작으므로 방정식 (9)를 만족하여 DDT 발생 가능성이 있다. 같은 방법으로 수소농도가 10 %v/o이고 수증기가 존재하지 않는 경우는 격실이 500 m^3부터 20,000 m^3까지 계산한 결과 약 10,000 m^3이상인 DDT 발생 가능성이 있어 보이나 그림 2에서 자료 부족으로 판단이 곤란하였다(표 4참조). 수소농도가 13% v/o인 경우(Φ=0.3566) 해당 기하학적 크기(500 m^3 부터 20,000 m^3)에서 DDT 발생이 가능하였다. 수소농도가 13 %v/o 이고, 수증기 10%v/o 이상인 경우 DDT 발생 가능성이 없으며, 수소농도가 15%v/o이고, 수증기 농도가 10 %v/o인 경우 모든 격실 크기 범위에서(500 m^3) DDT 발생이 가능하며, 수증기 농도가 20 %v/o인 경우 격실체적이 5,000m^3 이면 DDT 발생이 가능하였다(표 5참조). 수소농도가 20 %v/o인 경우 수증기 농도가 30

%v/o까지도 DDT가 발생하였다(표 6참조).

모델 및 위의 계산결과로 부터 두 방법론의 주요 특징을 비교하여 표 7로 나타내었다. System 80+에서 사용한 방법은 무엇보다도 상온 대기압 조건에서 사용할 수 있고, 기하학적 형상을 반영하여 초음속연소 발생여부를 판단하고 있다. W. Breitung 등이 개발한 방법론은 보다 고온에서의 실험자료와 여러 기하학적 형상을 가진 실험자료에 근거하고 있으나 실제 적용시 격실내의 장애물의 정도를 고려할 수 없다. 따라서 Syetem80+에 적용한 장애물의 정도와 결합하여 판단하면 보다 정량적인 관계를 얻을 수 있을 것으로 판단되나 향후 계속적인 연구가 필요하다.

2.3 초음속연소 발생 가능성 평가 방법론

초음속 연소 발생 가능성 평가 절차는 크게 네 가지 단계로 나누어 판단할 수 있다. 첫 번째는 사고경위선정으로 국부수소농도가 높게 발생할 수 있는 사고 경위를 선정한다. 현재까지 주로 국부수소농도가 높다고 알려진 사고 경위는 SBLOCA, TMLB 등이나 발전소 별로 안전계통이 다르기 때문에 발전소특성에 따라 선정되어야 한다. 두 번째로는 수소발생량의 결정으로 규제요건에서 Zr의 100% 산화를 원자로내.외를 구분하여 명시하고 있지 않으므로 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 최적계산에 의한 국부수소 농도 분석을 위해 원자로내 산화와 원자로 외부 즉 주로 캐비티에서 원자로 내에서 산화되지 못한 Zr의 산화에 의한 수소발생으로 이때 원자로내.외 산화는 규제요건대로 Zr의 100%의 산화를 고려해야 한다. 최적계산의 경우는 원자로 외부에서의 산화되어 방출된 수소에 의한 수소농도는 항상 상대적인 수치이기 때문에 MCCI 모델을 캐비티에 물이 존재하는 경우 캐비티가 완전히 고갈 될 때까지 MCCI를 발생하지 않도록 하느냐, 아니면 캐비티에 물이 존재하여도 용융물의 일부 열이 MCCI를 발생시키도록 하느냐에 많은 차이를 보인다[9]. 또 하나는 규제요건에서 Zr의 100% 산화를 원자로내.외를 구분하여 명시하고 있지 않으므로 원자로내에서 100% 산화에 의한 수소발생량에 대한 국부수소농도를 제어할 수 있어야 한다고 판단된다. 실제 System 80+에서는 원자로내 Zr의 100 % 산화를 모의하여 HMS(Hydrogen Mitigation Systems)의 성능을 평가하고 있다. 이 때 100 % 산화를 모의하기 위해 최적계산에 의해 얻어진 수소발생량을 1.5-1.75 배까지 증가시켰는데, 증가방법은 최적계산에 의해 수소발생량에 노심 손상과정동안 발생된 량을 평균하여 이 값으로 계속하여 100% 산화량에 해당하는 량에 도달할 때까지 방출한다고 모의하며, 이 기간동안 수증기는 방출되지 않으며, 100%에 도달하는 시점에서 원자로가 파손된다고 모의하였다. 세 번째로는 격납용기내 전체 격실에 대해 수소농도의 평균값은 초음속연소와 관련하여 크게 의미를 가지지 않기 때문에 각 사고경위에서 사고가 진행됨에 따라 격실별 최대 수소농도 및 수증기 농도를 조사하여야 한다. 마지막으로 국부수소농도에 따른 초음속연소 가능성 평가는 초음속연소 발생 기준을 설정 후 이 기준에 따라 최대 수소농도가 발생하는 격실에 대한 초음속연소 가능성 평가하여야 하는데, 본 논문에서 조사된 방법들이 초음속연소 발생 평가에 사용될 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 초음속연소기준 설정에 대해 System80+에 적용된 방법론과 최근 실험자료를 이용하여 W. Breitung 등이 제시한 방법론의 특징을 비교. 평가하였다. 비교결과 System80+에 적용된 방법론은 수증기 및 온도효과를 반영할 수 없고, 기하학적 형상에 대한 기준이 명확하지 않았다. W. Breitung 등이 개발한 방법론은 원전에 적용 가능한 여러 기하학적 형상의 실험자료를 토대로 만들어져 적용하는데 있어서도 사용자의 주관성을 배제하고 있었다.

참 고 문 헌

1. M. P. Sherman et al.,"FLAME Facility:The Effect of Obstacles and Transverse Venting on Flame Acceleration and Transition to Detonation for Hydrogen-Air Mixtures at Large Scale", NUREG/CR-5257, SAND85-1264, SNL, April 1989.
2. M. P. Sherman et al.,"The Possibility of Local Detonations During Degraded Core Accidents in the Bellenote Nuclear Power Plant", Nuclear Technology Vol. 81, April 1988.
3. ABBE-CE, "CESSAR-DC" Amendment V, April 29,1994.
4. AECL, "Proceeding of the OECD/NEA/CSNI Workshop on the Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques", AECL-11762, NEA/CSNI/R(96)8, Winnipeg, May 13-15, 1997.
5. National Academy Press,"Appendix G : Technical Aspects of Hydrogen Control and Combustion in Severe Light Water Reactor Accidents", NUREG-1370, 1987.
6. S. Dorofeev, "Experimental Results and Analysis on Hydrogen Combustion Behavior", CSARP Meeting, Bethesda, May 1993.
7. J.E. Shepard," Hydrogen Concentration Limits for Proposed New Designs of Nuclear Power Plants, Paper Prepared for the NRC, Jan. 1990.
8. S. Dorofeev et al.,"Recent Results of Joint FZK-IPSN-NRC-RRCKI Research Program on Large Scale H2 DDT Experiments in the RUT Facility,"CSARP Meeting, May 1997.
9. 박창규 등,"발전용원자로의 중대사고에 관한 연구", KAERI/RR-930/90, 한국원자력연구소, 1990년 9월

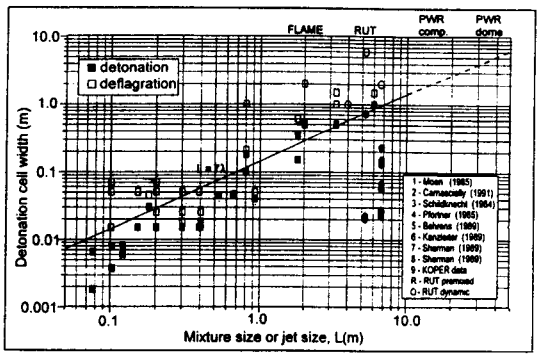

Figure 1 Experimental data on turbulent jet initiation and DDT in confined volumes.

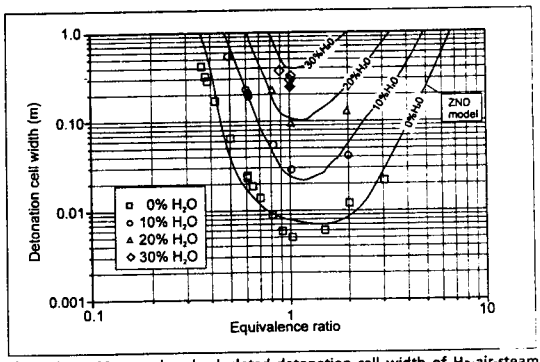

Figure 2 Measured and calculated detonation cell width of H_2-air-steam mixtures [25] for 100 °C and constant air density (41.6 mole/m³)

표 1. 농도별 초음속연소 발생 가능성 등급

혼합물 등 급	수소 몰 분율(v/o)	내용
1	24-30	초음속연소 가능성 매우 높음
2	21-24	등급1 보다 낮지만 초음속연소 가능성이 높음
3	15-21	기하학적배열이 DDT에 도움을 주도록 배열되어 있는 경우 DDT 발생이 관찰됨
4	13.5-15	DDT가 관찰되지 않음
5	< 13.5	DDT가 발생이 어려움

표 2. DDT 도움 정도 기하학적 특징 분류

기하학 등 급	내용
1	미연가스 팽창로에 장애물이 존재하는 국한된 대형 기하학적 형상. 장애물이 있으며, 개방된 쪽에서 폐쇄된 방향으로 점화가 진행되는 대형 튜브
2	기하학적 형상은 등급 1과 유사하나 튜드가 양쪽으로 개방되어 있거나, 가로 방향으로의 venting이 있는 경우
3	적당한 화염가속을 야기시킬 기하학적 형상으로 장애물이 있는 개방 튜브
4	소수의 장애물과 화염의 가로 방향으로 상당한 venting을 가진 대형튜브
5	제한되지 않은 기하학적 형상

표 3. 혼합물 및 기하학적 등급에 관한 SHERMAN/BERMAN RESULT CLASS

기하학적 등급	혼합물 등급				
	1	2	3	4	5
1	1	1	2	3	4
2	1	2	3	4	5
3	2	3	3	4	5
4	3	4	4	5	5
5	4	5	5	5	5

Result Class 1: DDT 가능성 매우 높음
Result Class 2: DDT 가능성 있음.
Result Class 3: DDT 가능성 할수도 있음.
Result Class 4: DDT 가능성이 매우 낮음.
Result Class 5: DDT 가능성이 거의 없음.

표 4. H_2=10%, Dry 조건(ϕ=0.265)

$V(m^3)$	L(m)	λ	7λ	R
500	7.937	> 3m	> 21m	<1
1,000	10	> 3m	> 21m	<1
5,000	17.09	> 3m	> 21m	<1
7,000	19.12	> 3m	> 21m	<1
10,000	21.54	> 3m	> 21m	≈ 1
15,000	24.66	> 3m	> 21m	≈ 1
20,000	27.14	> 3m	> 21m	≈ 1

표 5. H_2=15%, wet 조건

변수	수증기 농도			
	10%	20%		
ϕ	0.4773	0.55		
λ	~0.7m	~ 1.5m		
7λ	~ 4.9m	~ 10.5m		
V(L)	7.937	7.937	10	17.09
R	>1	<1	<1	1>1

표 6. H_2=20%, $V=500m^3$

변수	수증기 농도	
	20%	30%
ϕ	0.681	0.9546
λ	~0.6m	~ 0.4m
7λ	~ 4.2m	~ 2.8m
R	>1	>1

표 7. 두 방법론 결과 비교

방법	system80+	W. Breitung
Dry조건	H_2=15%이상에서 DDT가능	.H_2=13%이상 : $V=500m^3$이상 DDT가능 .H_2=10% : $V=10,000m^3$이상 DDT가능성 존재
Wet조건	평가 불가	.H_2=13%, H_2O=10% 이상: $V=20,000\ m^3$ 이하 DDT불가 .H_2=15%, H_2O=10%: $V=500\ m^3$ 이상 DDT가능 .H_2=15%, H_2O=20%: $V=5,000\ m^3$ 이상 DDT가능
기하학적 특성 반영	분류 용이하지않음.	실험자료에 고려됨. 실제적용시 격실내부 기하학적 배열상태 미고려