

## 캐비티내 포획 공간이 격납용기 직접가열 현상에 미치는 영향에 관한 연구

김평수 · 김무환 · 이동환

한국전력공사 · 포항공과대학교 기계공학과 · 울산대학교 항공공학과

### <요 약>

원자력발전소에서 가상되는 중대사고중 격납용기 직접가열 현상은 격납용기의 안전성을 위협하는 현상으로써 냉각재 상실사고 등의 1차계통의 사고시 가압되어 있는 용융노심물이 캐비티를 거쳐 격납용기로 분사되어 급격하게 많은 에너지를 방출하는 현상이다. 그러므로 이러한 격납용기의 안전성을 확보하기 위하여 본 연구에서는 격납용기로 분사되는 용융노심물을 감소시킬 수 있는 캐비티내에 포획 공간을 설치하여 이에 대한 실험과 수치적으로 해석하였다. 울진원자력발전소의 캐비티를 1/30 축소하여 포획 공간의 용적을 변화시키면서 실험하였다. 전산 수치해석은 CONTAIN 1.2에 도출된 실험 관계식을 적용하여 울진 원자력발전소에 설치된 포획 공간의 영향을 평가하였다. 연구결과로부터 포획 공간은 캐비티 외부로 방출되는 용융노심물을 감소시킴으로써 격납용기 직접가열 현상시 격납용기내부의 압력과 온도를 완화시켜 격납용기의 안전성에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

---

## A Study of the Effect of Capture Volume in a Cavity on Direct Containment Heating Phenomena

Kim, Pyoung Soo · Kim, Moo Whan · Lee, Dong Whan

Korea Electric Power Cooperation · Pohang University of Science and Technology  
· University of Ulsan

### <Abstract>

Direct Containment Heating, DCH, may occur during a core melt-down accident if the primary system pressure is still high at the time of vessel breach in a Nuclear Power Plant(NPP). Therefore, DCH is a most important phenomena to consider when assessing the integrity of the containment of severe accidents. This work consists of experimental and numerical analyses of the effects of capture volume in the cavity on DCH phenomena. The experimental model is a 1/30 scaled-down model of Ulchin NPP unit 3&4. We used three types of capture volumes to investigate the effect of size on the capture volume. Numerical analysis is performed by using CONTAIN 1.2 to examine the effect of capture volume on DCH phenomena in full scale at Ulchin unit 3&4

## 1. 서 론

원자력 발전소 중대사고 발생시 일차계통의 압력이 높으면 원자로 용기의 하부의 파열부를 통하여 고압 용융물 병출(High Pressure Melt Ejection)이 일어난다. 고온 고압의 증기가 원자로 용기에 녹아있는 용융 노심물을 미세 입자화시켜 캐비티를 통하여 격납용기 속으로 분사시킬 것이다. 이때 미세 입자는 격납용기 대기속으로 막대한 에너지를 전달시켜 격납용기의 온도 압력을 증가시키는데 이러한 현상을 격납용기 직접 가열 현상라고 한다. 격납 용기 직접 가열 현상 현상에 관한 연구는 원자력 발전소 안전성을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 그래서 격납용기 직접 가열 현상에 미치는 인자들을 규명할 필요가 있다. 지금까지 캐비티로 부터 격납 용기 속으로 산포되는 산포율을 감소시키기 위하여 캐비티의 기하학적 최적화가 제시되어있다.

이 연구는 캐비티의 기하학적 구조-포획 공간에 초점을 맞추고 있다. 포획 공간은 원자로 캐비티의 출구 벽을 따라 올라가는 용융 노심물을 수집하기 위하여 원자로 캐비티의 출구 벽 바닥쪽에 위치한다. 이것은 유동 실험을 고속 카메라를 이용하여 얻은 실험 결과이다. 울진 3&4호기 원자력발전소의 1/30 축소 보텔에서 실험하였고 CONTAIN 1.2 코드에 의한 수치 해석으로 포획 공간의 효과를 연구하였다. 또한 실험 결과로부터 새로운 상관 관계식을 개발하였다. 새로 개발된 상관 관계식을 이용하여 울진 3&4호기 원자력발전소의 실제 캐비티 포획 공간으로 확대 적용하였으며 이 자료들이 수치 해석에 사용되었다.

## 2. 실 험

Fig-1과 2는 실험 장치와 실험에서 사용된 포획 공간이 있는 캐비티를 보여주고 있다. 일차계통의 증기의 상사물로 질소가 사용되었으며 그 체적은 11,220 cc이다. 연료가 녹은 노심 용융 상사물로는 물이 사용되었으며, 부피는 471 cc이다. 캐비티로부터 격납용기로 산포된 물의 양을 측정하기 위하여 전자저울이 사용되었다.

포획 공간의 기준은  $12.8 \text{ m}^3$ 로서 올진 3&4호기 원자력 발전소의 연료 총 무게로부터 계산된 양이다. 1/30 축소 모델로서  $4.74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  기준 포획공간으로 실험하였다. 실험 포획 공간으로 1.8배, 3.6배, 5.4배의 기준 포획 공간이 사용되었다.

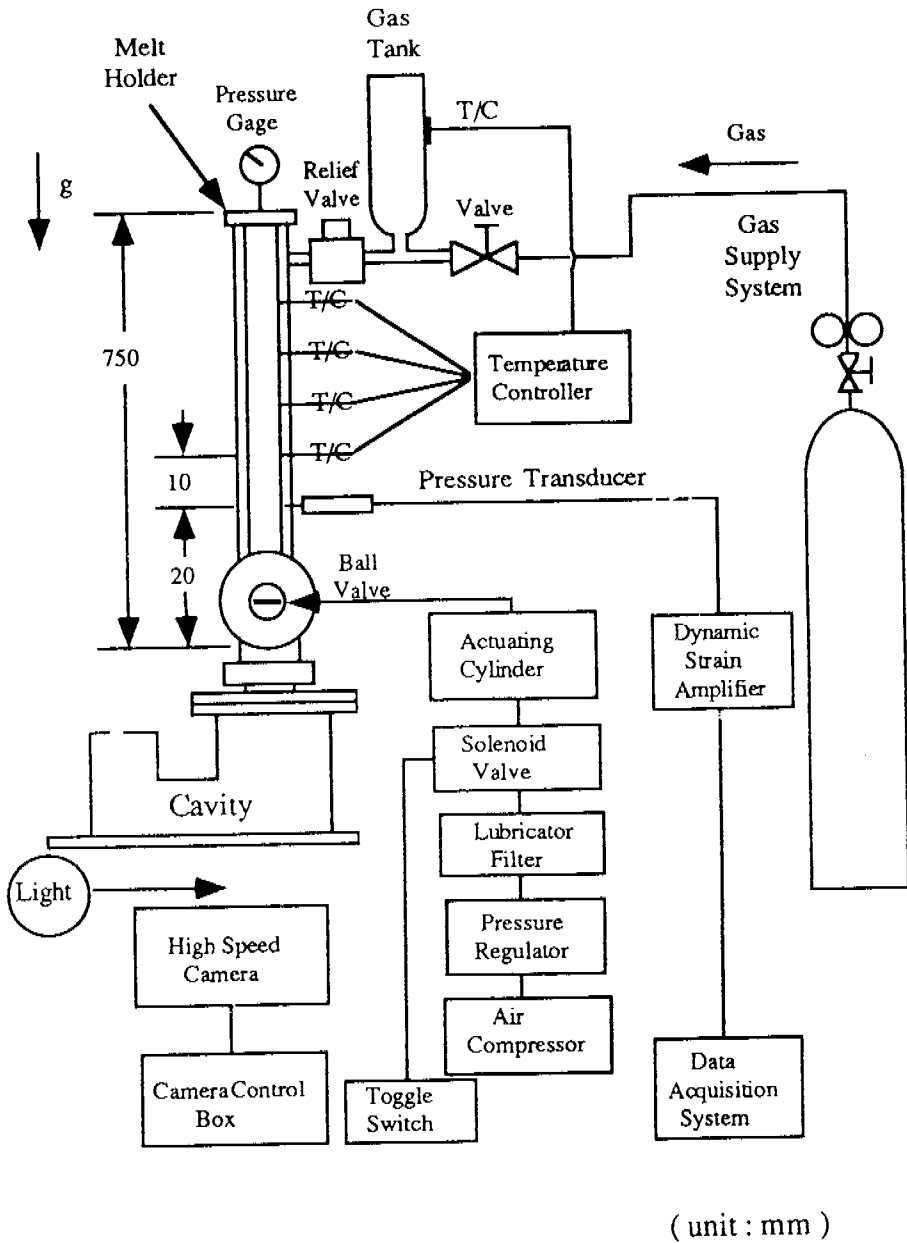


Figure 1. Schematic diagram of experimental facility

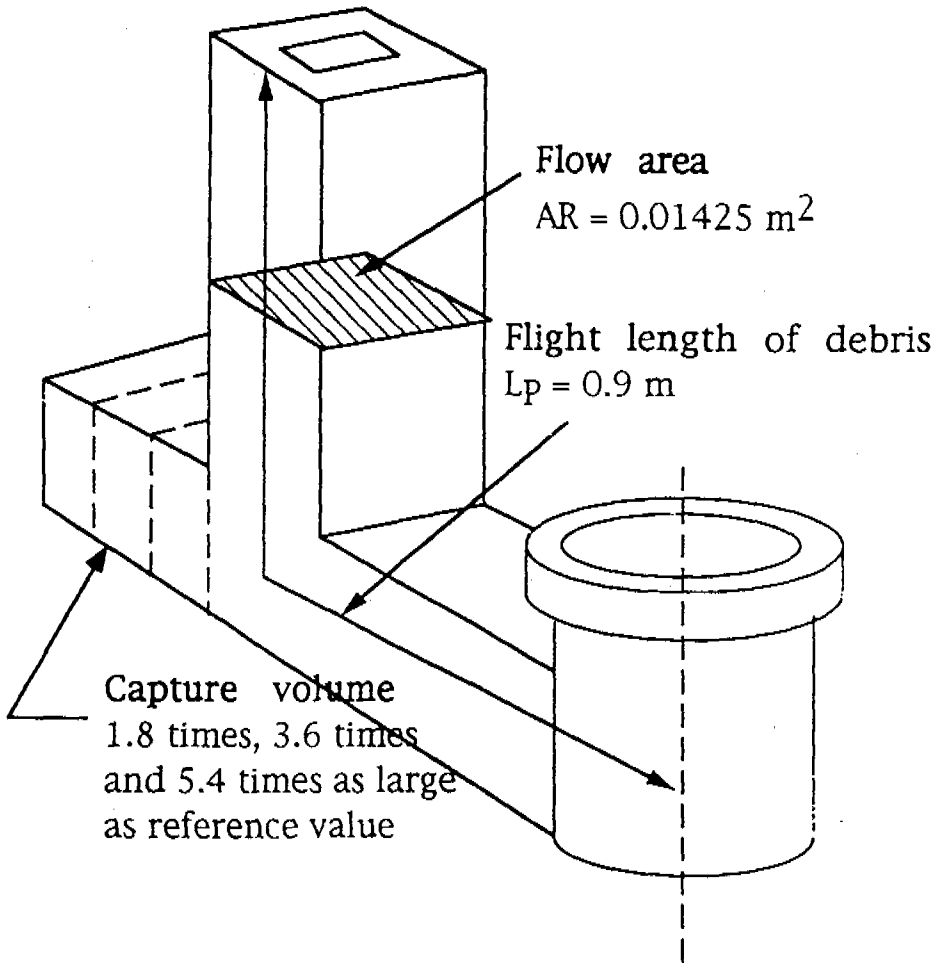


Figure 2. Cavity models used in experiment

Fig-3은 실험 결과를 보여주고 있다. 포획 공간의 크기가 증가함에 따라 캐비티로부터의 산포 분율이 감소되고 있다. 그래서 포획공간은 캐비티로부터의 산포분율을 감소시키는 효과적인 인자이다. 캐비티로부터의 산포분율이 감소되면 격납용기의 미세 입자량도 역시 감소한다. 격납용기 속의 미세입자로부터 대기로의 열전달량은 감소되어 포획공간이 없는 경우보다 격납용기의 온도 압력을 낮춘다. 이러한 실험 결과로 원자력 발전소 중대 사고 발생시 포획 공간이 격납용기 직접 가열 현상을 완화시키는 중요한 역할을 함을 발견하였다.

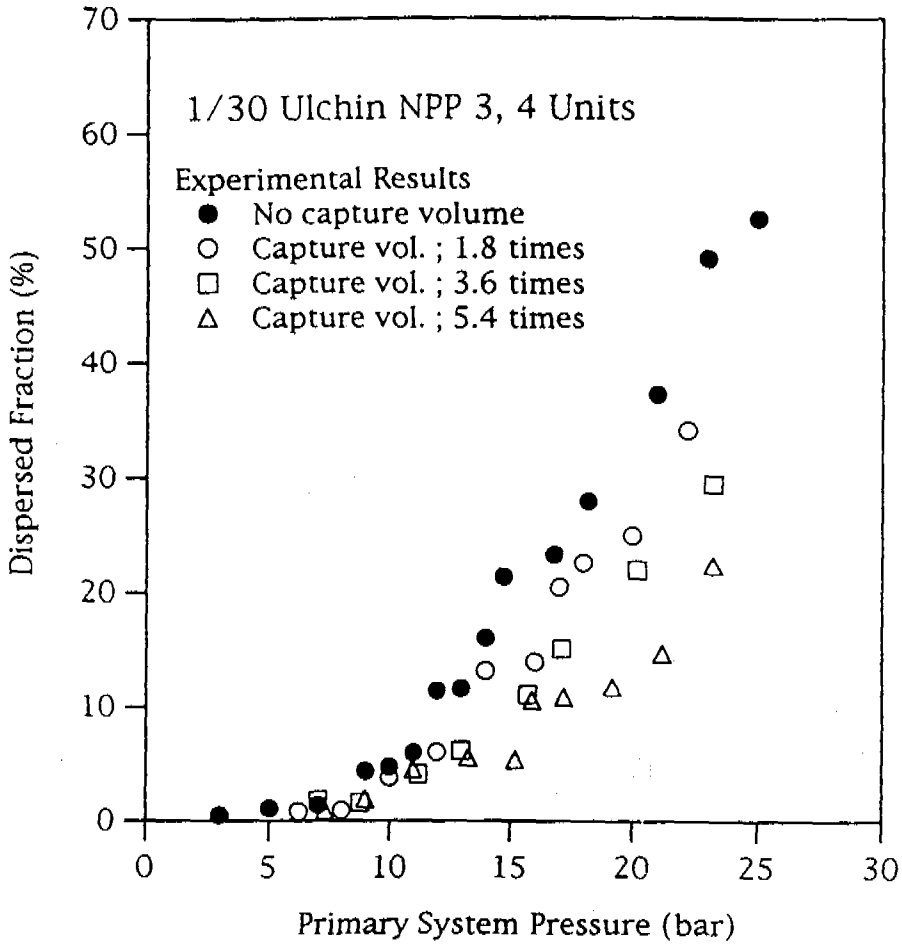


Figure 3. Experimental results for Capture Volume

### 3. 새로운 관계식 개발

지금까지의 연구로, 캐비티로 부터의 산포분율을 예측하는 관계식이 개발되었다. 실험자료는 무차원 시간 주기의 함수로 나타내었다. 이것은 액적 이탈된 미세입자가 유효시간 주기중 평균 속도로 비행함을 의미한다.

무차원 시간주기는 다음과 같다.

$$t^* = \frac{t_e U_{avg}}{L_P} \quad (1)$$

유효시간  $t_e$ 는 무차원수  $N_6$ 가 0.5될 때 까지 압력이 떨어지는데 걸리는 시간이며,  $N_6$ 는 환형 유동에서 액적이탈의 기준 값으로 Ishii가 1로 제안하고 있으나 실험 결과로는  $N_6$ 를 0.5로 채택하였다. Fig-4는  $N_6$ 와 산포 분율에 대한 실험 결과를 보여 주고 있다.

$N_6$ 는 다음과 같다.

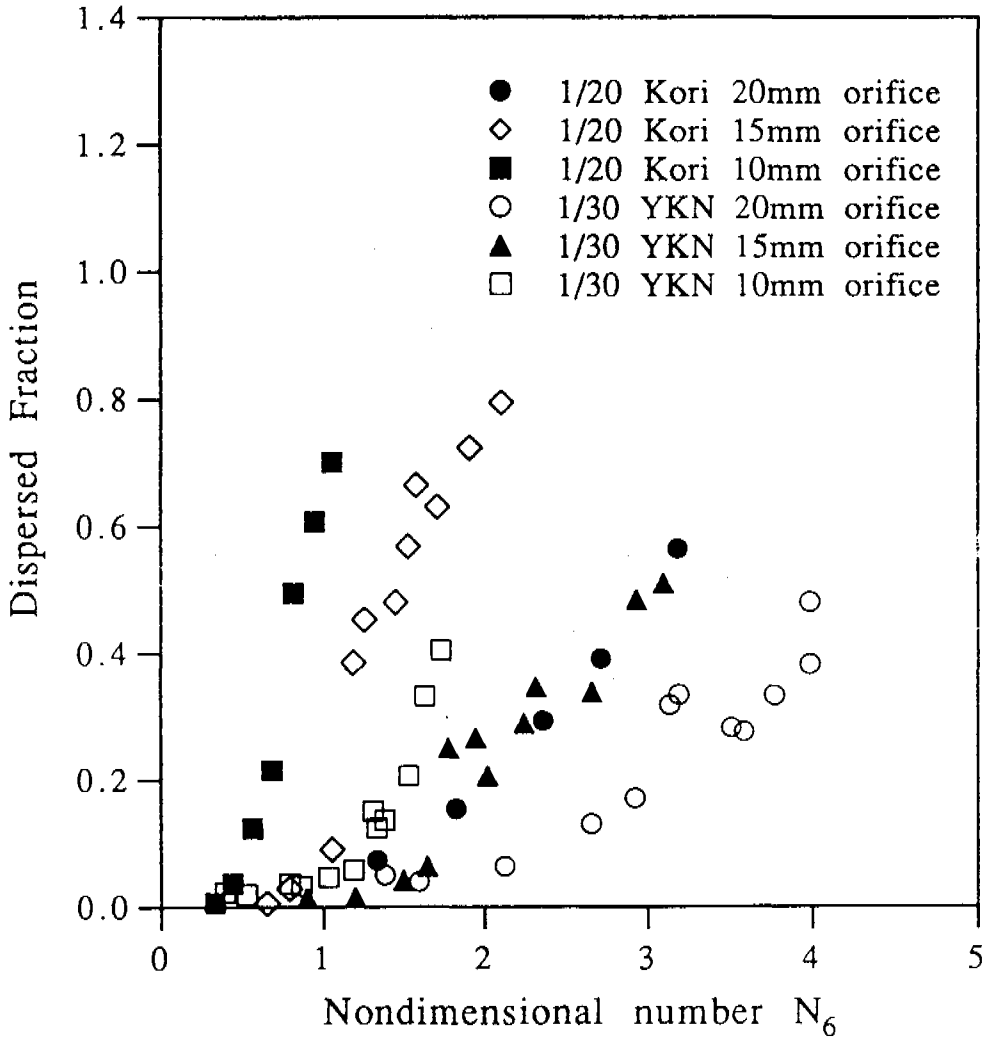


Figure 4. Dispersed fraction versus nondimensional number  $N_6$

$U_{avg}$ 는 유효시간 주기동안 액적이탈된 미세 입자의 평균 속도이다.  $L_p$ 는 액적이탈된 미세 입자의 비행거리이다. 여기서 무차원 유효시간 주기의 항으로 상관 관계식을 개발하였다. 상관 관계식은 다음과 같다.

$$\text{산포 분율(Dispersed Fraction)} = 40 \left\{ 1 + \tanh \left[ 3.79 \log \left( \frac{t^*}{15} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

Fig-5는 상관 관계식이 KAIST와 BNL 자료를 포함하는 실험 결과와 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 이 상관 관계식은 포획 공간의 효과가 포함되어 있지 않기 때문에 포획 공간의 영향이 미치는 새로운 관계식을 개발하였다. Fig-6은 상관 관계식이 실험 결과와 잘 일치됨을 보여주고 있다.

캐비티로 부터의 산포 분율은 무차원 유효시간  $t^*$ , 포획 공간의 없을 경우의 체적  $V_0$ 와 포획 공간 체적  $V_c$ 의 체적비와 관련이 있다.

$$\text{산포 분율} = 40 \left\{ 1 + \tanh \left[ 3.79 \log \left( \frac{T}{15} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

여기서

$$T = t^* \cdot \left[ -0.065 \left( \frac{V_c}{V_0} \right) \right]$$

$$t^* = \frac{t_e U_{avg}}{L_p}$$

Fig-7은 실험 규모의 산포 분율을 예측한것이고 실험 자료와 잘 일치된다.

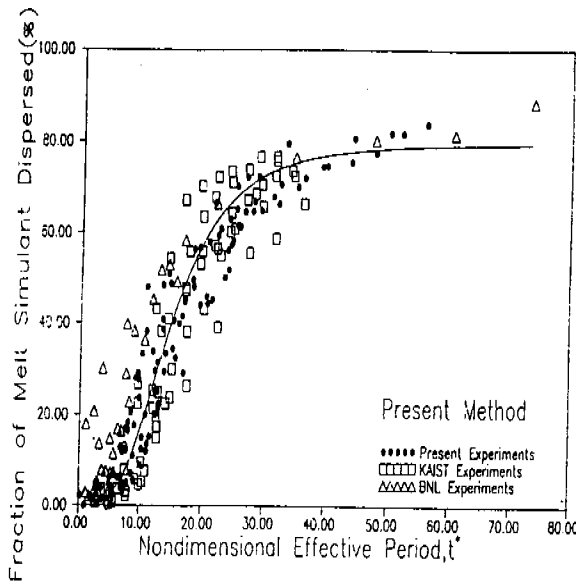


Figure 5. Apply the correlation to other experiments

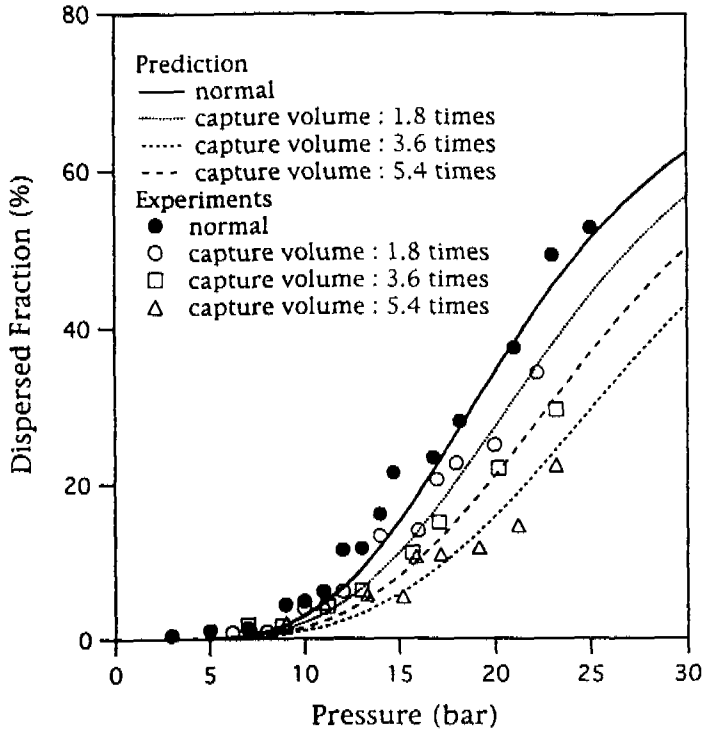


Figure 6. Prediction of dispersed fraction based on correlation for capture volume

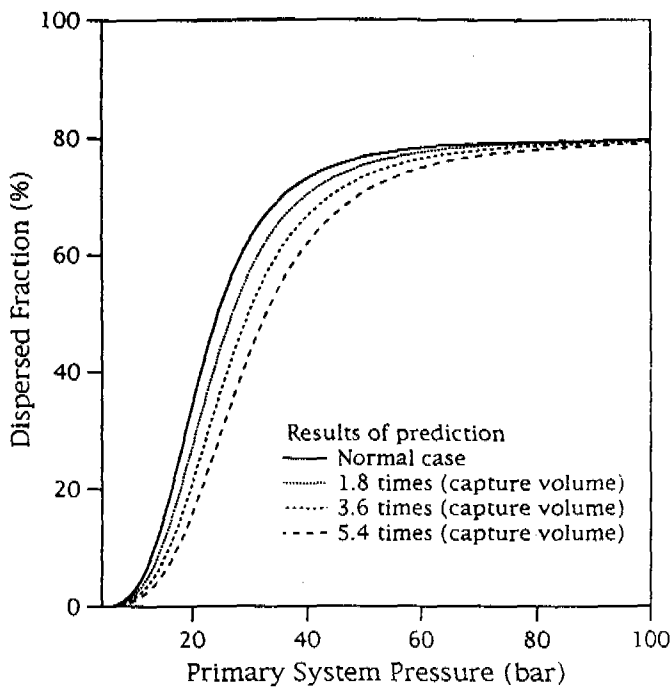


Figure 7. Prediction experimental scale(1/30 Ulchin NPP 3, 4 units)



새로운 관계식을 올진 3&4호기 원자력발전소 실제 규모에 적용하였다. Fig-8은 실제 올진 3&4호기 원자력 발전소의 캐비티로 부터 산포 분율의 예측 값을 보여주고 있다. 결과로 부터 포획 공간이 캐비티로 부터의 산포 분율에 미치는 효과적 인자임을 결론지었다. 이것은 중대사고 발생시 포획 공간이 있는 경우 포획 공간이 없는 경우보다, 격납용기의 온도/압력이 더 낮음을 의미한다. 그러나 포획 공간이 노심 용융물 기준 공간의 1.5배에서는 산포 분율이 작고 5배인 경우는 캐비티로 부터의 산포 분율에 현저하게 포획 공간의 효과가 큰 것으로 나타났다.

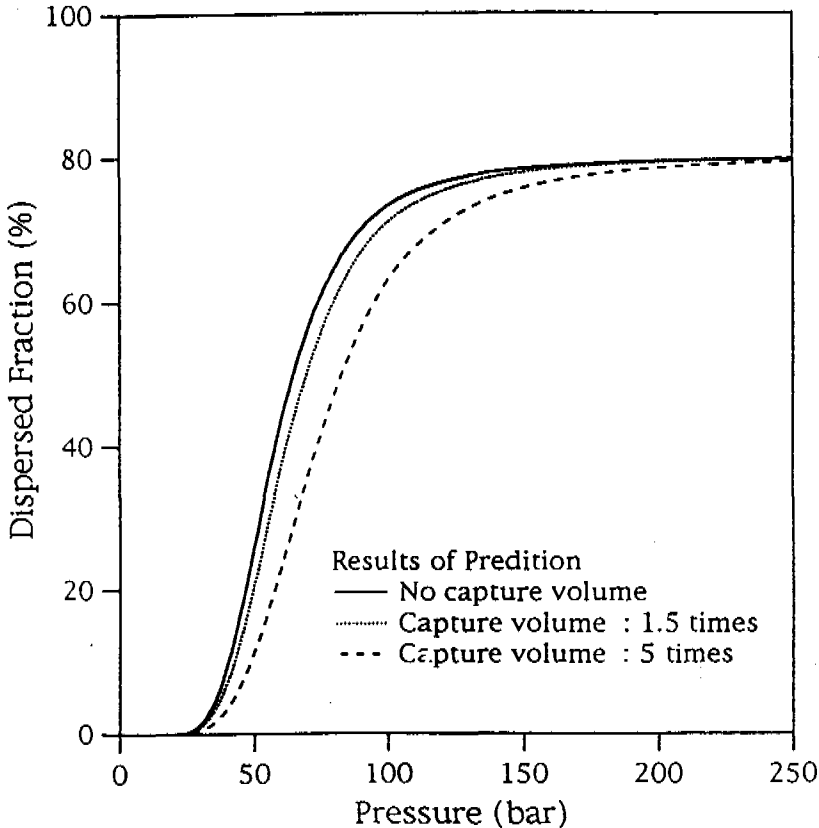


Figure 8. Prediction full scale(1/30 Ulchin NPP 3, 4 units)

#### 4. 수치 계산

CONTAIN 1.2 코드로서 수치 계산으로 올진 3&4호기 원자력발전소에서 격납용기 직접 가열 현상 현상에 미치는 포획 공간의 효과를 해석하였다. 원자로 압력용기로 부터의 방출 기체로 증기가 사용되었으며 온도는 623.15 K이고 노심 용융물은 산화우라늄, 크로미움, 철과 지르코늄으로 구성되어 있고 또한 캐비티에서의 액적이탈의 선원이다. 캐비티로 부터 액적이탈되어 산포된 미세 입자의 양은 새로운 관계식으로 부터 계산되었다. 노심

용융물 총량은 122.65톤으로서 산화우라늄 85.64톤, 지르코늄 25.35톤, 철 9.34톤과 크로미움 2.32톤으로 구성되어 있다. 노심 용융물의 액적이탈률은 계단 함수로 가정하였다. 예를 들면 산화우라늄인 경우 유효시간 주기동안 캐비티로 부터 액적이탈된 양은 5807.98 kg/sec이다. 노심 용융물의 온도는 2500K로 가정하였다.

수치 해석 모델은 5셀로 나누었으며 셀-1은 원자로 압력용기, 셀-2는 캐비티, 셀-3은 증기발생기 공간 셀-4는 증기발생기 공간을 제외한 원자로 관련 설비 공간이고 셀-5는 격납용기 상부 지역이다. 셀-1을 제외하고 수소 연소 모델이 허용되고 격납용기 직접 가열 현상 트래핑(Trapping) 모델이 사용되었다. Fig-9는 셀-5에서 계산된 수치 해석 결과의 압력이다. 원자로 관련 설비 공간의 압력은 격납용기 상부의 압력과 거의 같다. Fig-10 과 11은 원자로압력 용기의 압력 50bar에서 원자로 관련 설비 공간과 격납 용기 상부의 수치해석 결과의 온도이다. 수소의 연소로 초기 0-5초 사이에 온도 압력은 급히 상승하고 있다. 포획 공간이 있는 경우 포획 공간이 없는 경우보다 온도와 압력이 더 낮다. 포획 공간이 기준의 5배인 경우에 격납용기의 온도와 압력이 기준의 1.5배인 경우보다 더 낮다. 이것은 원자력발전소의 중대사고 발생시 포획 공간이 격납용기 직접 가열 현상 현상을 완화시켜 격납용기의 안전성을 향상시키는 중요한자중의 하나임을 의미한다.

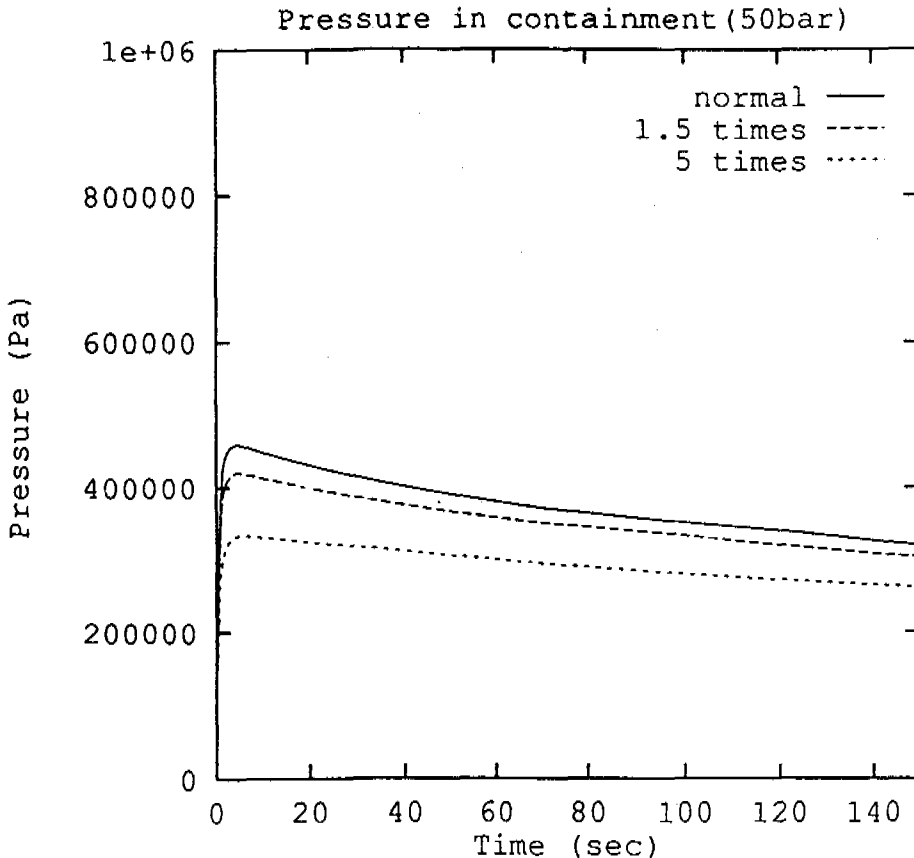


Figure 9. Calculation results of pressure in containment dome

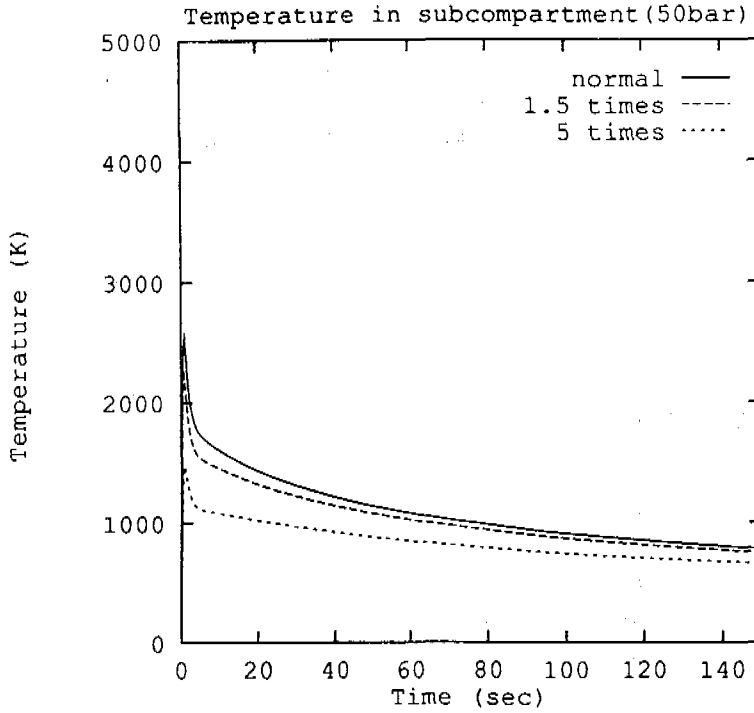


Figure 10. Calculation results of temperature in subcompartment

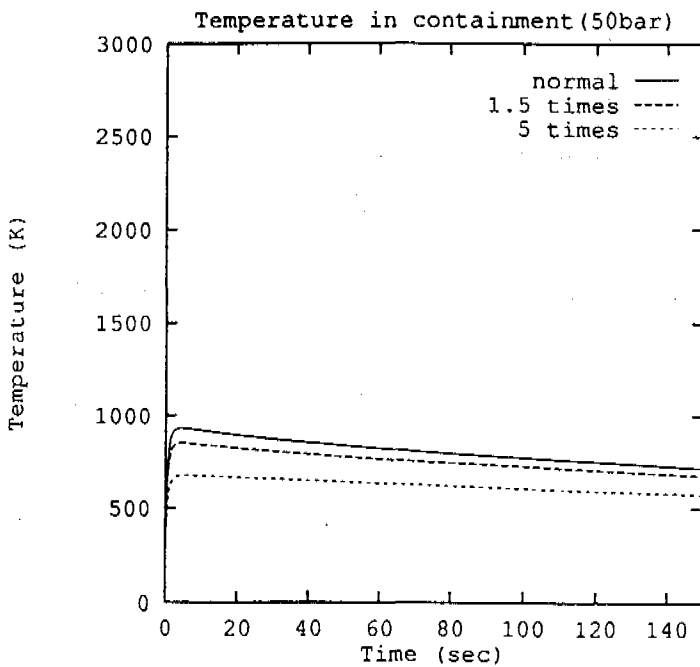


Figure 11. Calculation results of temperature in containment dome

Fig-12는 격납용기 상부에대한 수치해석 결과의 압력이다. Fig-13과 14는 원자로 관련 설비 공간과 격납용기 상부에대한 수치해석 결과의 온도이다. 원자로 압력용기의 압력이 70bar인 경우 포획 공간의 효과는 작다. 초기 압력이 높을 경우 캐비티로부터의 산포된 미세 입자가 격납용기속으로 신속히 빠져 나가기 때문이다. 따라서 원자로냉각재계통의 초기 압력이 증가함에 따라 포획공간에의해서 포획되는 미세입자량이 감소됨을 의한다.

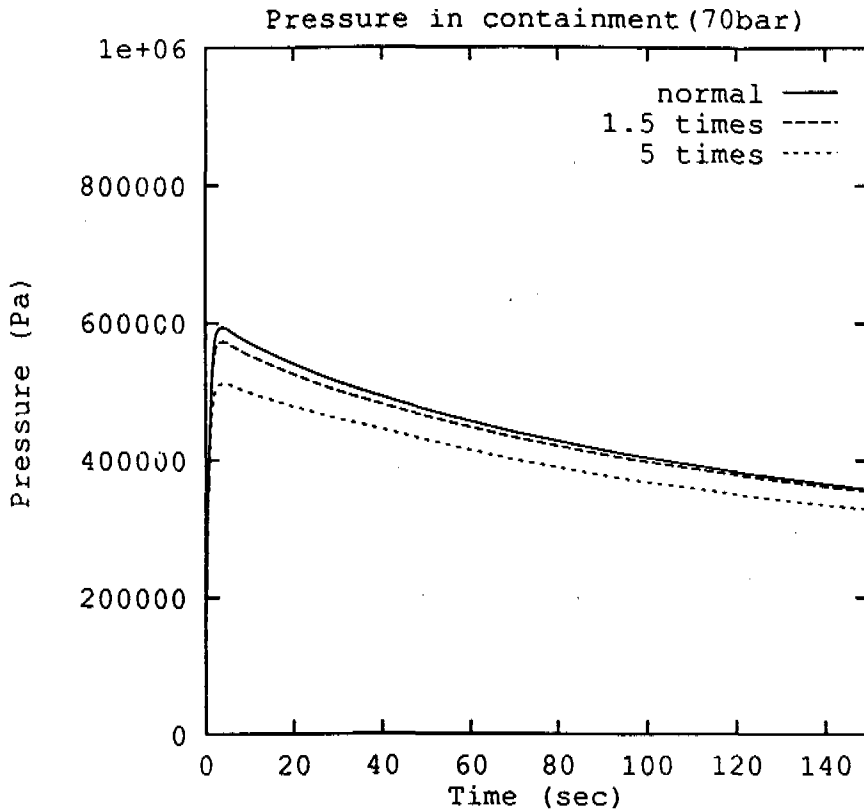


Figure 12. Calculation results of pressure in containment dome

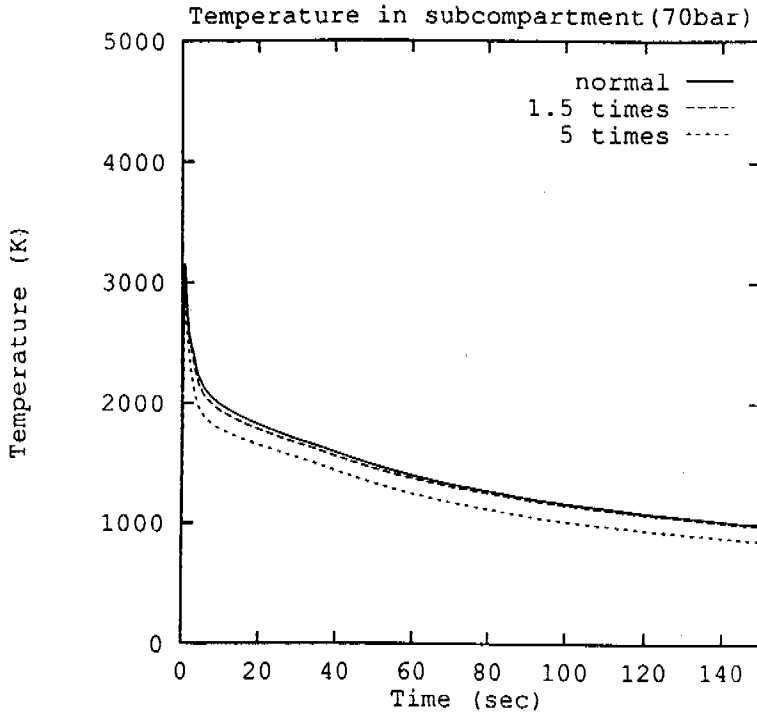


Figure 13. Calculation results of temperature in subcompartment

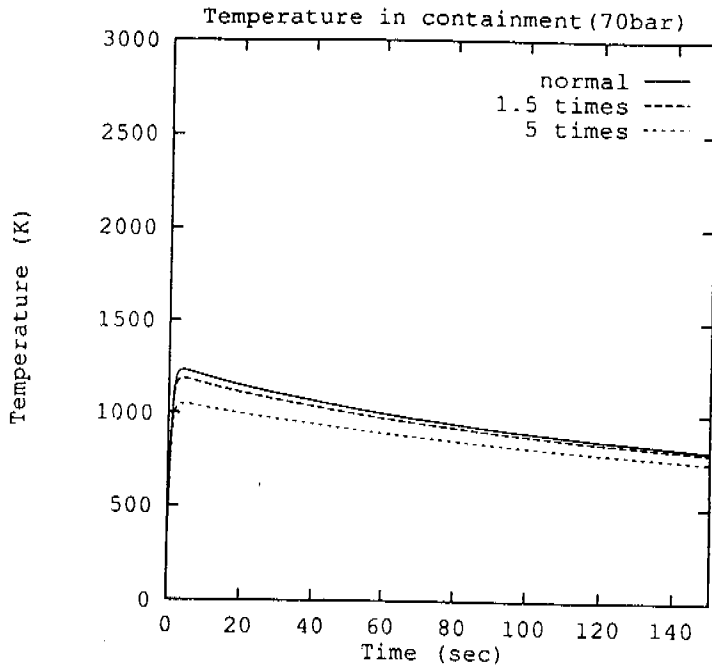


Figure 14. Calculation results of temperature in containment dome

Fig-15는 격납용기 상부에대한 수치해석 결과의 압력이다. Fig-16과 17은 원자로 관련 설비 공간과 격납용기 상부에대한 수치해석 결과의 온도이다. 원자로 압력용기의 초기의 압력은 150 bar이다. 이 압력에서는 포획 공간이 격납용기 상부의 온도와 압력을 낮추는데 영향을 미치지 못하고 있다.

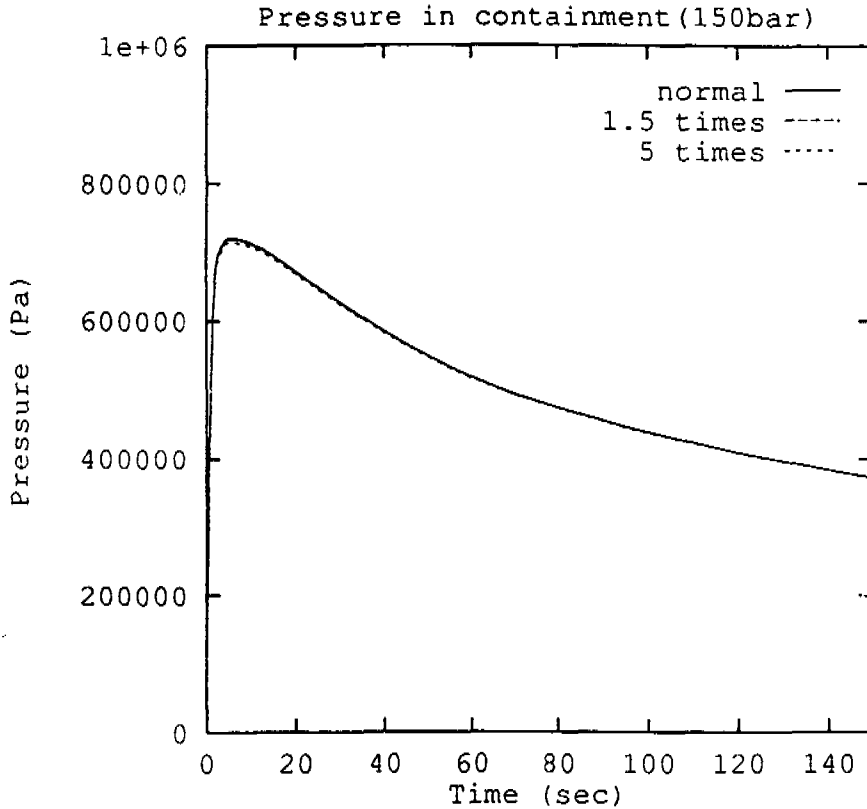


Figure 15. Calculation results of pressure in containment dome

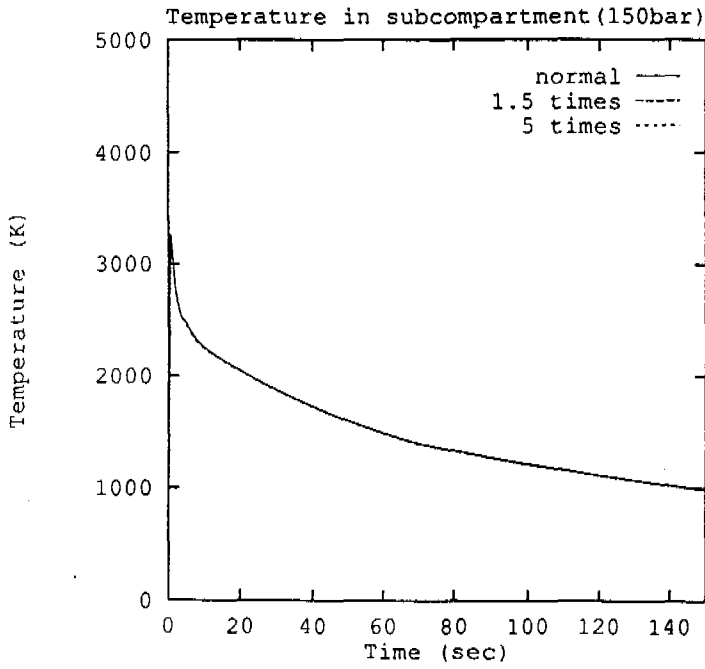


Figure 16. Calculation results of temperature in subcompartment

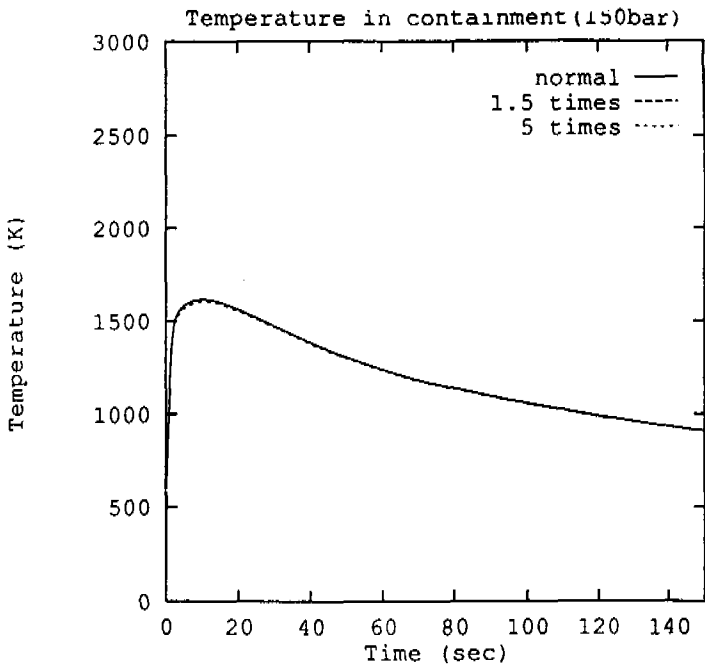


Figure 17. Calculation results of temperature in containment dome

앞에서의 수치해석의 결과로부터 원자로 냉각재 계통의 초기 압력이 70bar이하인 경우 포획공간의 효과가 현저함을 알 수 있다. 격납용기의 설계 압력은 4bar이다. Fig-9의 수치해석 결과로부터 포획공간 때문에 격납 용기의 압력이 설계압력보다 낮다. 캐비티의 설계를 간단히 수정함으로써 격납용기의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다.

## 5. 결 론

실험 결과로부터 포획 공간이 캐비티로부터 격납용기속으로 산포분율을 감소시키는데 기여하고 있음을 알 수 있다. 또한 포획 공간이 있을 경우 격납용기의 온도/압력이 낮음을 알 수 있다. 따라서 포획 공간이 원자력발전소 중대사고 발생시 격납용기 직접 가열 현상을 완하시키는 중요한 인자이며, 격납용기의 온도/압력을 충분히 낮추기 위해서는 포획공간이 기준 크기의 5배 이상은 되어야 한다. 이상의 논의로부터 원자력발전소에서 중대사고 발생시 격납용기 직접 가열 현상 효과를 완화시키기 위하여 캐비티의 최적 설계를 적용할 필요가 있다.

## References

- 1.- M.H.Kim et al., "Development of Korean Type Cavity Considering Direct Containment Heating", KAERI report, Postech, 1992.
2. J.E.Cha, C.Y.Chung and M.H.Kim, "An Experimental Study on Direct Containment Heating", International Topical Meeting, Safety of Thermal Reactor, Portland, 1991.
3. M.H.Kim, C.Y.Chung, "Experimental Study on Direct Containment Heating Phenomena", J. KNS. Vol. 25, No. 3, pp 413-423, 1993.
4. H.Y.Lee, "An Experimental Investigation of the Reactor Cavity Geometric Effect from Direct Containment Heating Phenomena", M.S. Thesis, Hanyang Univ. 1993.
5. KEPCO, "Preliminary Safety Analysis Report-ULCHIN Units 3 and 4", Vol 1., Chap. 1-3.
6. M. Ishii and M. A. Gromes, "Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent film Flow", AIChE J., Vol. 21, No. 2, pp. 308-317, 1975.