

예측모델 및 실험을 통한 액적충돌침식 손상 평가[§]

윤 훈* · 황 경 모*[†]

* 한국전력기술(주)

Evaluation of Liquid Droplet Impingement Erosion through Prediction Model and Experiment

Hun Yun* and Kyeong Mo Hwang*[†]

* KEPCO Engineering & Construction Company, INC.

(Received April 14, 2011 ; Revised August 10, 2011 ; Accepted August 12, 2011)

Key Words: Liquid Droplet Impingement Erosion(액적충돌침식), Wall Thinning(감육), Erosive Mechanism(침식 메커니즘)

초록: 유동가속부식(FAC)은 가장 잘 알려진 탄소강 배관 손상 메커니즘으로 현재 국내 전 원전에서는 유동가속부식으로 인한 감육현상을 관리할 수 있는 체계적인 방안이 수립되어 있다. 그러나, 발전소 배관은 다양한 침식손상 메커니즘에 의해 여전히 손상을 받고 있다. 대표적인 침식 메커니즘은 캐비테이션, 액적충돌침식(LDIE), 플래싱, 고체입자침식(SPE)이다. 본 논문에서 기술하는 액적충돌침식은 손상 예측이 어렵고, 관리를 위한 체계적인 방안도 수립되어 있지 않다. 본 논문에서는 실제 발전소 현장에서 발생한 사례를 바탕으로 기존에 개발된 예측 모델과 실험을 통해 얻어진 상관식을 비교하여 액적충돌침식으로 인한 손상을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다.

Abstract: Flow-accelerated corrosion (FAC) is a well-known phenomenon that may occur in piping and components. Most nuclear power plants have carbon-steel-pipe wall-thinning management programs in place to control FAC. However, various other erosion mechanisms may also occur in carbon-steel piping. The most common forms of erosion encountered (cavitation, flashing, Liquid Droplet Impingement Erosion (LDIE), and Solid Particle Erosion (SPE)), have caused wall thinning, leaks, and ruptures, and have resulted in unplanned shutdowns in utilities. In particular, the damage caused by LDIE is difficult to predict, and there has been no effort to protect piping from erosive damage. This paper presents an evaluation method for LDIE. It also includes the calculation results from prediction models, a review of the experimental results, and a comparison between the UT data in the damaged components and the results of the calculations and experiments.

1. 서 론

유동가속부식(FAC)은 탄소강 배관의 손상 메커니즘으로 가장 잘 알려져 있으며 현재 국내 전 원전에서는 유동가속부식으로 인한 감육관리를 위하여 체계적인 관리방안이 수립되어 있다. 그러나, 발전소의 배관은 유동가속부식 외에도 다양한 침식 손상 메커니즘에 의한 손상에 노출되어 있다. 대표적인 침식 메커니즘으로는 캐비테이션, 액적충돌침식(LDIE), 플래싱, 고체입자침식(SPE)이 있

다. 침식 메커니즘으로 인한 손상은 배관감육, 누설, 파단 사고의 원인이 되며, 발전소의 출력감발을 초래하여 경제적 손실을 유발시킬 수 있다.

최근 국내에서는 침식으로 인한 손상이 보고되고 있으며, 발전소의 가동년수가 증가할수록 그 빈도는 점차 증가할 것으로 예상된다. 이러한 중요성에도 불구하고, 침식 손상으로 인한 손상 평가 및 체계적인 관리를 위한 방안이 수립되어 있지 않은 실정이다. 이에 따라, 본 논문에서는 액적충돌침식을 정량적으로 평가하는 방법을 연구하였다. 이를 위하여 액적충돌침식의 발생 메커니즘을 분석하고, 기존에 제시된 예측모델을 도출하였다. 또한 별도로 수행한 액적충돌실험 결과로부터 상관식을 도출하였다. 각각의 3 가지 상관식을 통하

[§] 이 논문은 2011년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계 학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, hkm@kepc-enc.com

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

여 발전소에 실제 발생한 액적충돌침식 현상의 조건하에서 정량적 평가에 대한 기초연구를 수행한 결과를 제시하였다.

2. 액적충돌침식 메커니즘

2.1 발생 메커니즘

액적충돌침식은 물방울이나 액체가 고속으로 분사되어 배관 벽면 등과 충돌하여 발생하는 충격에 의해 침식이 발생하는 현상을 말한다. 주로 증기와 액적이 혼재하는 2 상 유체 배관에서 오리피스 설치, 밸브의 개방 또는 누설 등에 의해 증기와 함께 액적이 가속되는 경우에 발생한다. 액적이 배관 벽면 등에 충돌하면, 국부적으로 커다란 충격력이 발생하고, 충격력에 의해 배관 표면의 산화막이나 모재가 침식되는 경우가 있다. 이러한 현상을 액적충돌침식이라 한다. 플래싱은 고압 유체가 오리피스나 밸브를 통과할 때 발생하며, 압력이 포화증기압 이하로 내려가 증기가 생성된 후 회복되지 않고 2 상 유체(대부분 액체+약간의 기체)상태로 고속으로 배관에 충돌하여 발생하는 손상이다. 액적충돌침식은 메커니즘은 유사하나 2 상 유체(대부분 기체+약간의 액체)가 큰 압력강하를 통하여 가속되어 유체에 포함된 액적이 후단의 배관과 충돌하여 발생하는 손상이다. 액적충돌침식과 플래싱을 구별하는 주요 요인은 건도로 건도가 낮은 경우에는 플래싱이 발생하고, 건도가 높은 경우에는 액적충돌침식이 발생하는 특징이 있다.

Fig. 1 은 액적충돌침식의 발생 모식도를 나타낸 것이다. 일반적으로 액적충돌침식이 발생하기 쉬운 부위는 액적의 관성에 의해 벽면에 충돌하기 쉬운 엘보우 하류부의 외측이나 티와 같이 흐름방향이 변화되는 부분, 오리피스 및 밸브 직후단 배관 등이다. Fig. 2 는 복수기 튜브에서 발생한 액적충돌침식의 손상 표면 사진이다.

2.2 영향 매개변수

액적충돌침식에 영향을 미치는 매개변수는 주로 액체에 의한 영향 변수와 재료에 의한 영향변수로 분류된다. 유속은 액적충돌침식에 가장 영향을 많이 미치는 매개변수이다. 일반적으로 충격압력은 유속의 1~2 제곱, 감속속도는 유속의 4~5 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다.

이 밖에도 유체 내에 존재하는 액적의 크기, 액체의 밀도, 점도 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 액적충돌침식에 대한 내성은 재료에 따

라 달라지며, Heymann⁽²⁾은 재료의 경도에 따라 스테인리스 강을 기준 재료로 선정하여 상대적인 무차원 내침식성(Normalized Erosion Resistance)을 Fig. 3 과 같이 제시하고 있다.

3. 대상 컴포넌트의 감육률 계산

실제 현장에서 침식으로 인한 손상이 발생한 컴포넌트를 대상으로 하여 설계자료를 분석하였다. 대상 컴포넌트는 고압 급수가열기에서 복수기로 배기되는 라인에 포함되어 있는 티 형상의 컴포넌트이다. 고압 급수가열기의 고압 2 상 유체가 복수기로 배기되면서 고속 유체가 형성될 수 있으며, 가지배관에서 유입된 유체가 모관의 반대쪽 배관면을 수직으로 타격하도록 설치되어 있어 액적충돌침식의 발생가능성이 매우 높다.

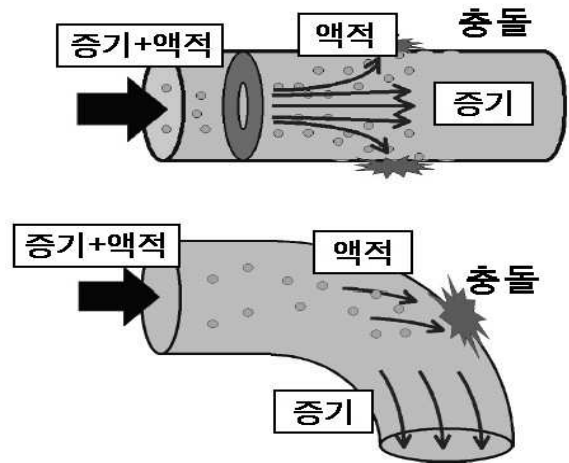


Fig. 1 Scheme of LDIE

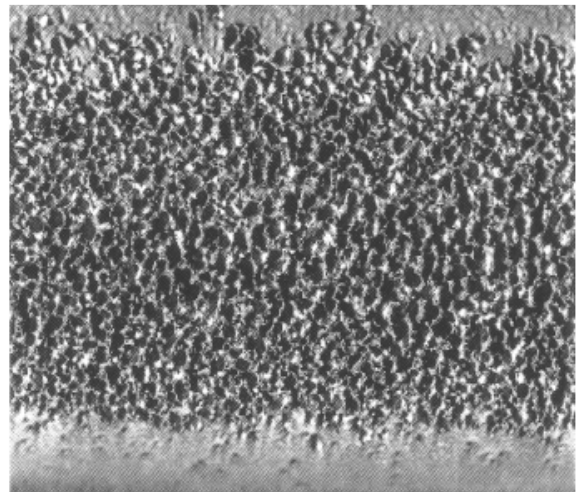


Fig. 2 Damaged surface caused by LDIE⁽¹⁾

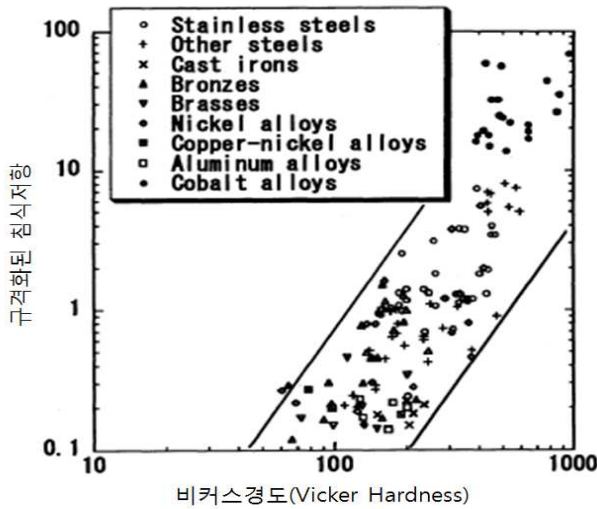


Fig. 3 Normalized erosion resistance

컴포넌트의 위치는 Fig. 4 와 같으며, 설계 데이터는 Table 1 에 제시하였다. 컴포넌트의 UT 데이터를 바탕으로 감육률을 계산하였다.

컴포넌트의 운전시간은 22.5 년이며, 실제 컴포넌트의 데이터를 활용하여 계산된 감육률은 0.31mm/y 이다.

4. 액적충돌침식 예측모델 및 계산

액적충돌침식 예측을 위하여 유체의 상태량과 감육량과의 관계를 규명하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 다양한 예측 모델 중 감육량 예측이 가능한 모델을 선정하여 계산을 수행하고 결과를 분석하였다.

이들 예측모델에서 감육률 계산을 위하여 필요한 일부 데이터는 수치해석 결과값을 활용하였다. 평가에 활용한 데이터는 다음과 같다.

- 건도 : 0.94
- 질량유량 : 5,605.66 kg/s
- 유속 : 94.14 m/s
- 온도 : 198.88 °C

4.1 Heymann의 예측모델

Heymann⁽³⁾은 액적충돌침식에 의해 발생한 감육률을 예측하기 위하여 단순화된 모델을 제안하였다. Heymann의 평가모델은 액적의 크기가 0.6mm 이상인 조건에서 재질, 유속, 그리고 유체 함량의 함수로 이루어져 있으며, 이 식을 이용하여 감육량의 계산이 가능하다.

Table 1 Design data

Material	Pres. (MPa)	Temp. (°C)	Pipe Size (mm)	T _{nom} (mm)
Carbon Steel	1.72	198.88	154.20	7.11

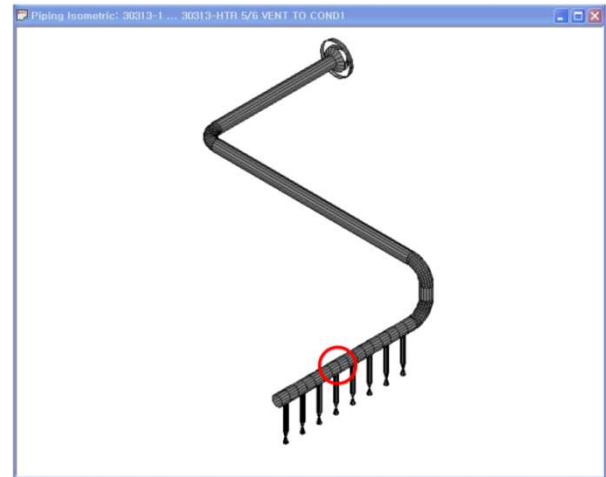


Fig. 4 Location of component

제안된 평가식은 재료의 감육체적을 충돌한 액적의 총체적으로 나눈 값(N_e : Rationalized Erosion Rate)의 예측식이며, 아래의 식 (1)은 탄소강 배관일 경우에 적용할 수 있다.

$$N_e = 1.6025 \cdot 10^{-19} \cdot v^{5.047} \quad (1)$$

여기서, N_e 는 Rationalized Erosion Rate을 의미하며, v 는 액적의 충돌속도(m/s)이다. 위의 평가모델에 따라 액체유속에 따른 N_e 값을 계산하였다. 액적의 유속에 따른 N_e 값의 관계는 Fig. 5와 같다.

Heymann의 평가모델에서 N_e 값은 단위시간당 손실체적(m^3/s)과 단위시간당 충돌액적의 체적(m^3/s)의 비로 나타난다. 대상 컴포넌트에서의 유체 질량유량을 이용하여 액적의 체적을 구한 다음, N_e 의 결과값을 활용하여 감육률을 계산하였다.

대상 컴포넌트의 건도 0.94 조건에 대한 유속과 감육률의 상관관계는 Fig. 6과 같다. 계산값은 재료 손실이 발생하는 면적과 유체의 액적이 충돌하는 면적이 동일하다고 가정하고 감육률(mm/y)을 계산하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Heymann 평가모델에서 유속 94.14m/s에서 대상 컴포넌트에 대한 감육률을 계산한 결과, 감육률은 0.53mm/y로 계산되었다.

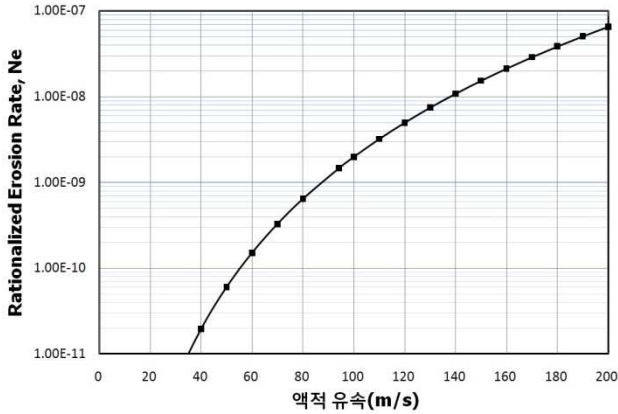


Fig. 5 Correlation between Ne and velocity

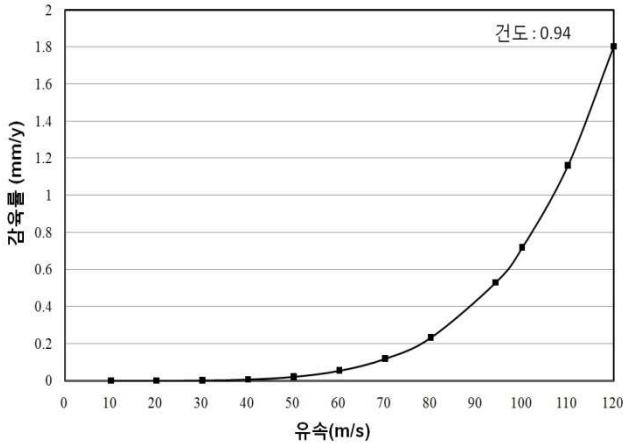


Fig. 6 Correlation between wear rate and velocity (Heymann model)

4.2 Sanchez-Caldera 의 예측모델

Sanchez⁽⁴⁾는 2 상 유체가 흐르는 발전소 2 차측 배관에서의 액적충돌침식에 의한 감육량을 결정하기 위하여 아래의 식 (2)와 같은 예측식을 제안하였다. 예측식은 대수식으로 표현되어 있으며 유체의 속도와 건도 등의 함수이다.

$$\dot{m} = \frac{C \cdot \rho_f \cdot \dot{m}_{tot} \cdot (1-x) \cdot V^4 \cdot F_e \cdot F_h}{(P \cdot \epsilon_c)^2 \cdot A_c} \tag{2}$$

여기서, \dot{m} 은 감육률, \dot{m}_{tot} 은 총질량유량, C 는 상관계수, ρ_f 는 액체의 밀도, V 는 액적의 속도, x 는 유체의 건도, A_c 는 액적에 의한 손상 면적, F_e 는 액적의 혼입율로써 계산되는 액적유입계수, F_h 는 충돌계수, P 는 탄성계수이다.

액적의 속도를 증기유속으로 가정하고 다음의 식 (3)과 같이 액적의 속도를 계산할 수 있다.

Table 2 Input data for Sanchez model

ρ_f (kg/m ³)	ρ_g (kg/m ³)	\dot{m}_{tot} (kg/s)	x	V (m/s)	A_c (m ²)
865.96	7.69	5,605.66	0.94	94.14	0.00387

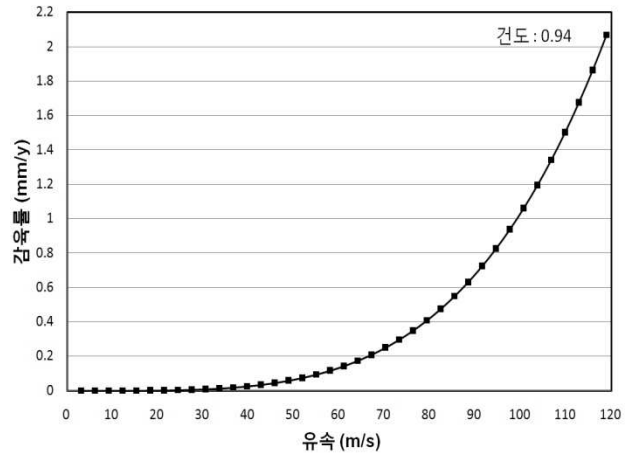


Fig. 7 Correlation between wear rate and velocity (Sanchez model)

$$V = V_g \cdot \frac{4 \cdot \dot{m}_{tot} \cdot x}{\pi \cdot \rho_g \cdot d^2} \tag{3}$$

여기서, V_g 는 증기의 유속이며, ρ_g 는 증기의 밀도이다. A_c 는 액적이 충돌하는 영역의 면적을 나타내며, 굴곡부에 대한 값으로서 $A_c = 1.5d^2$ 으로 계산된다. F_e 는 액적의 혼입율로써 계산되는 액적유입계수이다. F_h 는 충돌계수를 의미하며 엘보나 티등의 형상에 따라 정해진다.

Sanchez-Caldera 예측모델을 활용하여 대상 컴포넌트에 대하여 감육률을 계산하였다. 계산에 사용한 입력 데이터는 Table 2 와 같다.

Fig. 7 은 건도를 매개변수로 한 유속(m/s)과 감육률(mm/y) 간의 관계를 나타낸 그래프이다. 유속 94.14m/s 에서 대상 컴포넌트에 대하여 Sanchez-Caldera 예측모델을 활용하여 감육률을 계산한 결과, 감육률은 0.81mm/y 로 계산되었다.

4.3 액적충돌실험⁽⁵⁾

액적충돌침식으로 인한 배관 재료의 손상 정도를 파악하고 원인 규명을 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 압축공기와 물을 혼합하여 2 상유체를 만든 후 노즐을 통하여 대상 시편에 연속적으로 타격하면서 시간에 따른 두께 변화를 관찰하였다.



Fig. 8 Photograph of specimen during experiment

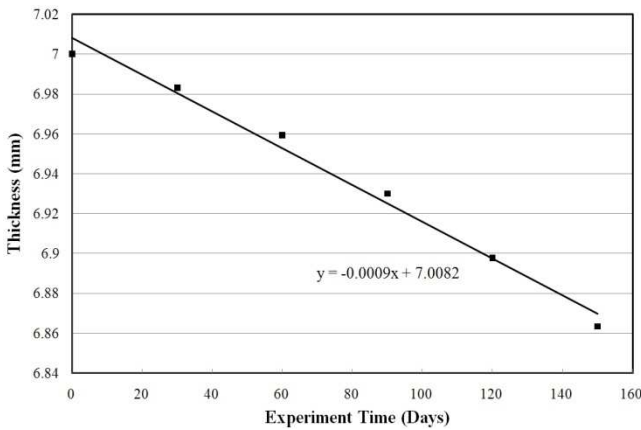


Fig. 9 Thickness according to time change⁽⁵⁾

실험은 공기와 물의 유량비를 조절하여 유체내 액적함량을 0.5 고정하고, 유체가 실험시편을 타격하는 평균속도가 186.89m/s 의 조건에서 수행하였다.

Fig. 8 은 유체가 시편에 분사되는 모습이다. 대상 시편은 30 일 간격으로 꺼내어 질량을 측정후, 이를 최소자승법을 활용하여 감육률을 계산하였다.

Fig. 9 는 시간에 따른 두께 변화를 나타낸 그래프이며, 실험을 통하여 계산된 감육률은 0.33 mm/y 로 계산되었다.

5. 데이터 분석

대상 컴포넌트에 대하여 액적충돌침식 예측모델을 통하여 계산된 감육률, 실제 측정된 감육률, 그리고 실험을 바탕으로 계산한 감육률을 비교하였다. 계산 결과는 Table 3 과 같다.

UT 데이터를 활용하여 계산한 감육률과 예측모델을 활용하여 계산한 감육률은 Heymann 모델에서 1.7 배, Sanchez 모델에서 2.62 배 정도 보수적으로 감육률이 예측됨을 알 수 있었다.

Table 3 Comparison result of wear rate

No.	평가방법	감육률 (mm/y)	Ratio (%)
1	UT 데이터	0.31	1.00
2	Heymann 예측모델	0.53	1.70
3	Sanchez 예측모델	0.81	2.62
4	액적충돌침식 실험	0.33	1.06

액적충돌침식 실험에서 구한 감육률과 UT 데이터에서 계산된 감육률의 비는 1.06 으로 확인되었다. 액적충돌침식은 기체에 포함된 액적의 함량과 액적의 충격력에 관련이 있는 것으로 알려져 있으며, 실험은 측정 배관 내부의 운전조건과 유사한 환경에서 수행하였다. 이러한 실험 및 예측모델을 활용하여 감육률 계산을 직접적으로 수행할 경우 여러가지 제약조건을 고려해야 한다.

Heymann 모델의 경우 액적충돌침식을 발생시키는 여러 가지 요인 중 유속만의 함수로 되어 있어, 액적경의 크기, 건도 등의 다양한 영향변수를 고려할 수 없는 한계가 있다. 특히, 유속이 증가함에 따라 감육률이 기하급수적으로 증가하는 경향을 보인다.

Sanchez 모델은 Heymann 의 모델에 비해 다양한 영향변수를 고려하고 있지만, 컴포넌트 내부에서 발생하는 액적의 상태를 제대로 반영하지 못하는 제약조건이 있다. 모델에서 제시된 유속, 건도, 유량 등은 일반적으로 해당 컴포넌트에서의 평균값이 사용된다. 그러나 동일 컴포넌트라도 내부에서 액적의 속도, 건도 등은 큰 차이를 보일 수 있다. Sanchez 모델을 통해 감육률을 계산하는 경우에는 속도가 국부적으로 최대가 되는 위치에서의 유속이나 건도 등의 값을 활용할 필요가 있다.

6. 결론

본 논문에서는 발전소에서 발생할 수 있는 액적충돌침식 손상에 대하여 발생 메커니즘을 분석하고, 평가할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

검토를 위하여 우선, 국내 원전에서 액적충돌침식이 발생한 컴포넌트를 대상으로 설계자료를 분석하고, 감육률 계산을 수행하였다.

또한, 다양한 문헌조사를 통하여 액적충돌침식을 예측할 수 있는 모델을 분석하고, 그 중 감육률 계산이 가능한 모델을 선정하고, 각각의 모델

에 대하여 대상 컴포넌트의 데이터를 적용하여 감육률을 계산하였다.

그리고, 액적충돌침식 실험을 통하여 얻어진 관계식을 이용하여 감육률을 계산하였다. 이렇게 계산된 감육률을 비교하여 액적충돌침식을 평가할 수 있는 방안을 제시하였다.

검토 결과, 예측모델에서 계산된 감육률은 다소의 가정 조건을 내포하고 있으며, 실제 배관에서 발생한 감육률 보다 다소 보수적으로 계산되는 경향이 있는 것을 확인하였다.

액적충돌침식 실험 결과를 통해 얻어진 감육률은 제한된 표본에 대한 실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 계산되었다. 따라서, 차후 더 많은 종류의 표본에 대한 실험을 통하여 평가 결과를 검증할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2004, "Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems," TR-1011231.
- (2) Heymann, F. J., 1969, "Speed Impact between a Liquid Drop and a Solid Surface", *J. applied Physics*.
- (3) Heymann, F. J., 1992, "Liquid Impingement Erosion," *ASM Handbook*.
- (4) NUREG/CR-5007, 1987, "Prediction and Mitigation of Erosive-Corrosive Wear in Secondary Piping Systems of Nuclear Power Plants."
- (5) Kang, D. W., Lee, S. K., Kim, K. H., Hwang, K. M., 2010, "Investigation of Loss of Carbon Steel Tube Material by Liquid Impingement Erosion," *Proc. Of 2010 KSME Fall Annual Meeting*, Jeju, pp. 3388~3392.