

균열면에 작용하는 내압과 열전달의 영향을 고려한 노즐부의 응력확대계수 해석

정민중* · 김영진* · 강기주** · 범현규** · 표창률***
(1999년 12월 15일 접수)

Stress Intensity Factor Analysis of Nozzle Considering Pressure and Heat Transfer on Crack Face

Min-Joong Jeong, Young-Jin Kim, Ki-Ju Kang, Hyeon-Gyu Beom
and Chang-Ryul Pyo

Key Words: Finite Element Analysis(유한요소해석), Heat Transfer(열전달), Internal Pressure(내압),
Stress Intensity Factor(응력확대계수), Surface Crack(표면결함)

Abstract

In order to investigate the effect of nozzle on stress concentration in pressure vessels, three dimensional finite element analyses were performed. The results were compared with those for corresponding two dimensional axisymmetric finite element analyses. A three dimensional finite element model with a surface crack was also designed to evaluate the effect of internal pressure and heat transfer on crack face, and the resulting stress intensity factors from the finite element analyses were compared with those for ASME Sec. XI and Raju-Newman's stress intensity factor solution. As a result, the validity of currently available stress intensity factor solutions for a surface crack was reviewed in the presence of geometrical complexity, heat transfer and internal pressure.

1. 서 론

가압경수로 1차계통에는 원자로, 증기발생기, 가압기 등과 같은 압력용기가 사용되고 있다. 이들 압력용기들은 고온, 고압의 환경하에서 운전되고, 계통구성상 많은 배관이 연결된다. 이러한 배관의 연결부, 즉 노즐부는 형상의 불연속으로 인한 응력집중과 가동중의 반복하중으로 인해 용접부에서 결함발생 가능성이 높으므로 구조적 건전성 평가가 요구된다. 따라서 압력용기 개구부에서의 구조적 건전성과 노즐의 강도계산에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 압력용기의

노즐부에 대한 응력해석시에는 구형 헤드부에 대한 개구부의 영향과 헤드부와 실린더형 몸체의 기하학적 형상변화를 고려해야 한다.^(1,2)

원자력발전소 1차계통의 기기 및 배관에서 결함이 발견될 경우, 파괴역학분석(Fracture Mechanics Analysis; FMA)을 수행하여 안전성을 입증하여야 한다. 결함의 안전성을 평가하기 위해서 사용되는 공학적인 해석방법에는 Raju-Newman 식⁽³⁾과 ASME Sec. XI⁽⁴⁾ 식이 있다.

Raju-Newman 식과 ASME Sec. XI 식은 각각 평판의 표면결함과 실린더 내벽의 표면결함에 대하여 유도된 것으로 결함이 없는 경우에 대한 동일 부위의 응력분포로부터 간접적으로 응력확대계수(Stress Intensity Factor, K)를 구한다. 따라서 결함이 압력용기의 노즐부와 같은 복잡한 형상에 존재할 경우는 Raju-Newman 식과 ASME Sec. XI 식을 이용한 응력확대계수 해석결과가 결함을 포함한 실제 응력확대계수 해석보다 보수적임을 입증하여야 한다. 또한 표면결함의 경우, 그 결함면에는 내압이 작용하고 온도변화에 따른 열전달이

* 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

** 회원, 전남대학교 기계공학과

*** 회원, 인덕대학 기계과

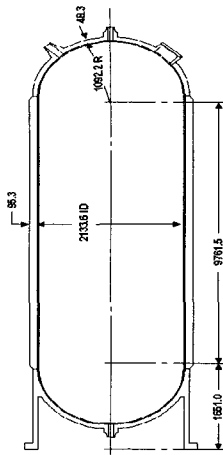


Fig. 1 A schematic illustration of pressurizer (Unit : mm)

발생하므로 이에 대한 고려도 있어야 한다. 그러나 결함면에 작용하는 내압의 영향은 Raju-Newman 식에서는 고려되지 않았고, 결함면에서의 열전달의 영향은 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식 모두에서 고려되지 않았다.

본 논문에서는 먼저 압력용기 상부와 노즐의 형상을 고려한 3차원 유한요소해석결과와 단순화한 2차원 유한요소해석결과를 비교하였다. 또한 결함을 포함한 노즐부와 상부헤드부에 내압 및 열전달이 작용하는 경우에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 이때 해석결과로부터 결함면에 작용하는 내압과 결함면에서의 열전달이 실제 응력확대계수 값에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서는 이러한 평가를 기반으로 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식으로 구한 응력확대계수 값과 실제 유한요소해석으로 구한 응력확대계수 값을 비교, 분석하였다.

2. 응력해석

Fig. 1은 본 논문에서 사용한 압력용기의 형상을 나타낸 것이다. 압력용기 상부헤드의 내측 반경은 1092.2 mm, 두께는 48.3 mm이며 본 논문에서는 상부 좌측 노즐을 고려하였다.

원자력발전소 주요기기에 대한 정확한 응력해석은 상당한 기술적 노력과 프로그램 응용이 필요하다. 따라서 대부분의 경우에는 응력해석시 소모되는 시간과 경비를 절약하기 위하여 3차원 형상을 2차원 축대칭 모델로 변환하여 응력해석

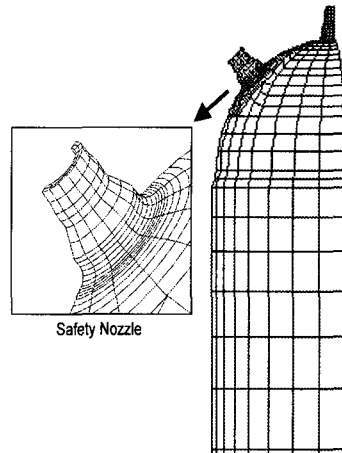


Fig. 2 A three dimensional finite element model of pressure vessel

을 수행하고 있다.⁽⁵⁾ 그러나 본 논문에서는 압력용기 상부 노즐부를 고려한 3차원 유한요소해석과 압력용기 노즐에 대한 2차원 축대칭 유한요소해석을 각각 수행하고 그 결과를 비교 검토하였다. 응력해석에는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽⁶⁾를 사용하였다.

Fig. 2는 압력용기의 3차원 응력해석에 사용된 유한요소모델로 전체모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/8만을 모델링하였다. 해석에 사용된 요소수는 총 1,814개로 20절점 등계수 사각주요소 (20-node isoparametric brick element)를 사용하였다.

2차원 응력해석에 사용된 모델은 Fig. 3과 같이 노즐부만을 축대칭으로 단순화하였으며, 요소수는 260개, 요소형태는 8절점 축대칭요소를 사용하였다.

하중조건은 내압이 작용하는 경우와 온도변화가 작용하는 두가지 경우로 구분하였다. 내압이 작용하는 경우는 경수로 압력용기 운전조건중 가장 큰 내압인 21.5 MPa을 적용하였다. 이때 노즐 끝단에는 내압에 의한 축방향의 응력이 작용한다고 설정하였다. Table 1은 열응력 해석에 사용된 온도이력을 나타낸 것으로, 현재 가동중인 경수로 압력용기의 운전조건중 시간에 따른 온도변화가 가장 심한 조건을 적용하였다.

3. 응력확대계수 해석

Fig. 4는 본 논문에서 가정한 결함의 위치와 크

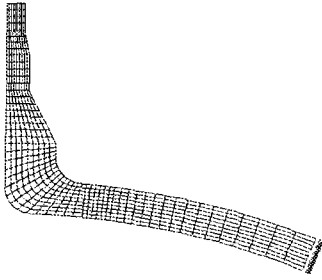


Fig. 3 A two dimensional finite element model of safety nozzle

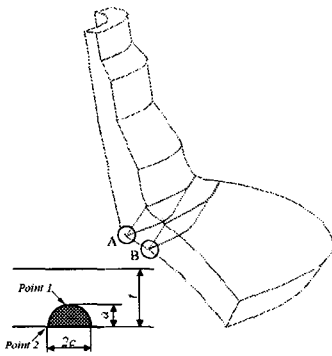


Fig. 4 Surface crack of safety nozzle

기를 나타낸다. 일반적으로 최대응력은 노즐의 끝단인 “A” 지점에서 발생하지만 “B” 지점은 실제 용접부에 해당하여 균열 발생 가능성이 높아 이 지점에 균열을 가정하였다. 이때 결함깊이 a 는 벽두께의 20%인 9.65 mm, 결함길이 $2c$ 는 19.30 mm인 반타원형 결함으로 가정하였다. Fig. 4에서 Point 1은 결함의 최심점이며, Point 2는 결함의 표면점이다.

결함에 대한 응력확대계수 계산에는 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식이 가장 널리 사용된다. 이 방법들은 결함을 고려하지 않은 상태에서 구한 응력분포를 이용하여 결함이 존재하는 부위의 응력확대계수를 구하는 방법으로 각각에 대한 세부적인 내용을 아래에 기술하였다.

- Raju-Newman 식

Raju-Newman 식은 Fig. 5와 같이 실린더에 존재하는 표면결함에 적용할 수 있으며, 결함면에서의 최대응력을 결함면의 열림응력으로 간주하고, 이때의 응력분포를 다음과 같은 3차 다항식으로 표현한다.⁽³⁾

Table 1 Loading condition for temperature change

Time (sec.)	Fluid Temp. (℃)	Heat Transfer Coeff.(W/m ² ℃)
0	344.8	148.0
10	330.1	233.2
20	313.3	207.6
30	300.2	179.7
40	291.6	162.5
50	287.4	154.2
100	284.8	154.2
200	274.3	154.2
400	233.6	154.2
700	204.4	154.2

$$\sigma = \sum_{i=0}^3 M_i x^i \tag{1}$$

이때 응력확대계수 계산식은 다음과 같다.⁽³⁾

$$K = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sum_{i=0}^3 G_i M_i a^i \tag{2}$$

여기서,

Q = 결함형상계수

$$= 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}$$

G_i = 영항계수

($t/R, a/c, a/t, 2\phi/\pi$ 의 함수)

M_i = 곡선적합상수

a = 결함깊이

- ASME Sec. XI 식

ASME Sec. XI 식에서는 표면결함의 경우, 응력확대계수 계산에 사용되는 결함위치에서의 응력분포를 다음과 같은 3차 다항식으로 이상화하여 사용한다.⁽⁴⁾

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \tag{3}$$

여기서,

x = 내벽에서 벽두께 방향으로의 거리 ($0 \leq x/a \leq 1$)

a = 결함깊이

A_0, A_1, A_2, A_3 = 곡선적합상수

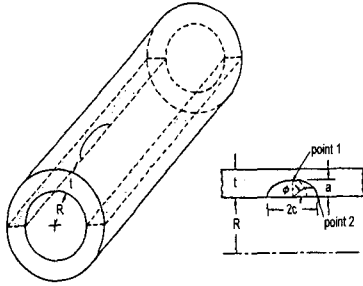


Fig. 5 Internal surface crack of cylinder

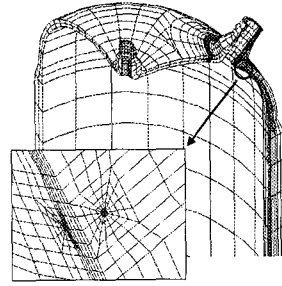


Fig. 6 Finite element model used for K analysis

표면결함에 대한 응력확대계수는 식 (3)의 상수 $A_0 \sim A_3$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$K = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3]\sqrt{\pi a/Q} \quad (4)$$

여기서,

A_p = 내압

G_0, G_1, G_2, G_3 = 자유표면수정계수

Q = 결함형상계수

결함형상계수 Q 는 다음과 같이 정의된다.⁽⁴⁾

$$Q = 1 + 4.593(a/c)^{1.65} - q_y \quad (5)$$

여기서,

c = 결함길이

a/c = 결함비 ($0 \leq x/c \leq 0.5$)

q_y = 소성역 보정계수

$$= [(A_0G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3)/\sigma_{ys}]^2/6$$

식 (4)는 평판에 대한 응력확대계수 계산식인 Shiratori 식⁽⁷⁾에 원통형 용기에 대한 Raju-Newman 식의 유한요소해를 고려하여 작성한 식이다.

앞의 식들은 무한평판(ASME Sec. XI 식의 경우)이나 실린더(Raju-Newman 식의 경우)에 존재하는 표면결함으로부터 유도된 것이다. 만일 압력용기 노즐과 같은 복잡한 형상에 결함이 존재할 경우에는 응력분포가 다양한 양상을 보일 것이다. 따라서 이러한 결함의 안전성을 분석하기 위해서는 보다 정밀한 방법을 통하여 응력확대계수를 계산하여 ASME Sec. XI 및 Raju-Newman 식에 의한 응력확대계수 값과 비교하여야 한다.

본 논문에서는 결함을 포함한 압력용기의 실제 기하학적 형상을 모사해 3차원 유한요소모델을

만들고, 결함선단(crack tip)에서는 응력의 특이성(singularity)을 나타내기 위하여 특이요소(singular element)인 20-nodes quarter-point brick element를 사용하였다. 응력확대계수 계산은 현재까지 제시된 것 중에서 가장 정확하다고 알려진 Shih등⁽⁸⁾의 영역적분법에 의하여 J -적분을 구한 후 이를 응력확대계수로 환산하는 방법을 사용하였다. 평면변형을 조건에서의 J -적분과 응력확대계수의 관계는 다음과 같다.

$$K = \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} \quad (6)$$

본 논문에서는 이와 같이 유한요소해석으로 응력확대계수를 구하는 방법을 ‘직접 K 계산법’이라고 부르기로 한다. Fig. 6은 직접 K 계산법에서 사용한 유한요소모델이며 모델에 사용된 요소수는 2,726개이고 절점의 수는 14,489개이다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 3차원 응력해석과 2차원 응력해석으로 구한 벽두께 방향으로의 응력분포를 나타낸 것으로 각각 내압만 작용한 경우와 열응력이 작용한 경우의 결과이다. 3차원 응력해석 결과와 2차원 응력해석 결과를 비교하면, 내압이 작용하는 경우 2차원으로 구한 압력용기 내벽 쪽에서의 응력값이 3차원으로 구한 값보다 7% 크게 나타났다. 온도변화가 작용하는 경우 역시 압력용기 내벽에서 2차원으로 구한 값이 9% 크게 나타났다. 이는 압력용기 노즐부와 같은 구형의 헤드부의 개구부 응력해석시 2차원 모델사용이 보수적임을 나타낸다. 내압이 작용하는 일반적인 실린더형 구조물은 내벽에 가장 큰 응력이 발생

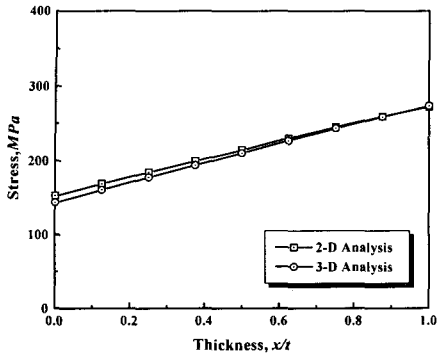


Fig. 7 Stress distribution along the thickness under internal pressure loading condition

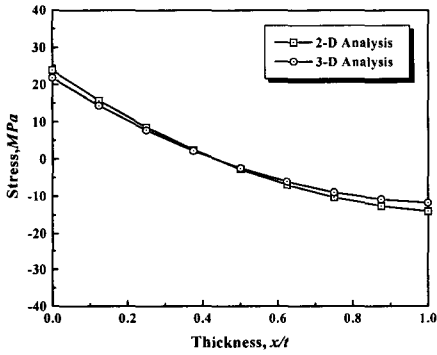


Fig. 8 Stress distribution along the thickness under thermal loading condition

하고 두께에 따라 감소하지만 본 연구와 같이 노즐을 고려하면 노즐로 인한 굽힘 하중이 발생하여 외벽이 인장 상태가 되며 이로 인해 외벽의 응력값이 내벽보다 커진다.

Fig. 9와 Fig. 10은 앞에서 구한 응력해석결과를 사용하여 ASME Sec. XI과 Raju-Newman 식으로 구한 응력확대계수 값을 비교하여 나타낸 것이다. 내압이 작용하는 하중조건으로 2차원 응력해석결과를 사용한 경우의 응력확대계수는 3차원 응력해석결과를 사용한 결과에 비하여 최대 6% 정도 큰 값을 나타낸다. 온도변화가 작용하는 하중조건에서 응력확대계수는 2차원 응력해석결과를 사용한 경우가 3차원 응력해석결과를 사용한 경우에 비하여 최대 10% 정도 큰 값을 나타낸다. 이러한 응력확대계수의 차이는 응력확대계수 계산에 사용된 2차원과 3차원 응력해석 결과의 차이에 의한 영향이다. 또한 ASME Sec. XI 식은

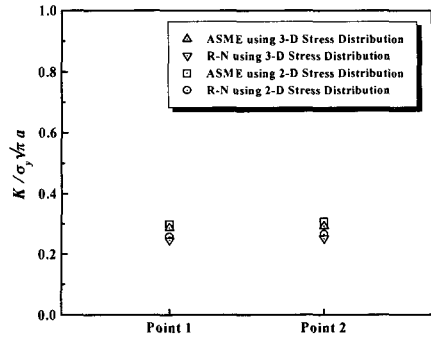


Fig. 9 Normalized stress intensity factors by ASME Sec. XI & Raju-Newman under internal pressure loading condition

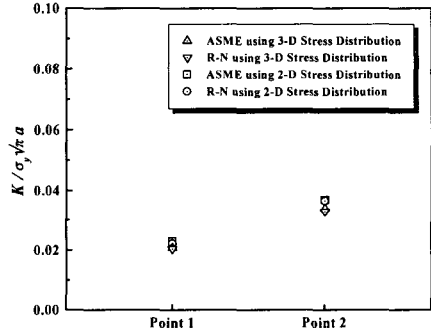


Fig. 10 Normalized stress intensity factors by ASME Sec. XI & Raju-Newman under thermal loading condition

내압을 고려할 수 있어 이를 고려하지 못하는 Raju-Newman 식 보다 큰 응력확대계수 값을 얻는다. 두 그림에서 열응력에 의한 응력확대계수는 내압에 의한 응력확대계수의 8%~12% 이므로 압력용기의 건전성평가에는 내압에 의한 영향이 크다.

Fig. 11과 Fig. 12는 직접 K 계산법을 사용하여 결함표면에 내압이 작용하는 경우와 작용하지 않는 경우로 나누어서 해석한 결과이다. 이때 내압이 작용하는 하중조건하에서 결함면에 내압을 고려한 경우가 결함면에 내압을 고려하지 않은 경우에 비하여 결함의 최심점에서의 응력확대계수 값이 13% 정도 증가하였다. 온도변화가 작용하는 하중조건하에서의 응력확대계수 값은 결함면에서의 열전달을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 결함의 최심점에서 22%, 결함의

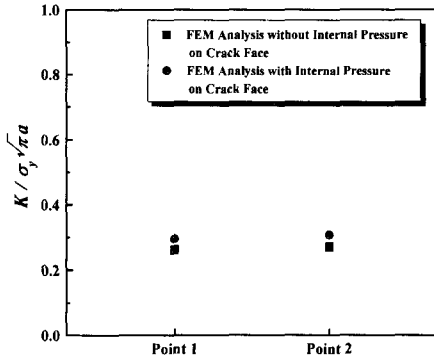


Fig. 11 Stress intensity factors by FEA under internal pressure loading condition

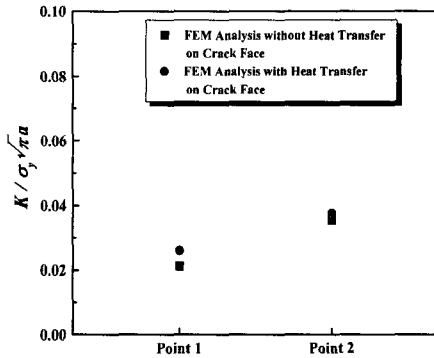


Fig. 12 Stress intensity factors by FEA under thermal loading condition

표면점에서는 6% 정도 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과는 결함면의 열전달을 고려하지 않은 경우에 결함의 최심점에서의 온도구배는 Fig. 13과 같이 크지 않으나 결함면의 열전달을 고려한 경우에는 Fig. 14와 같이 균열의 최심점이 표면점에 비하여 큰 온도구배를 나타내기 때문이다. 즉 결함면의 열전달을 고려한 경우, 균열의 최심점에서는 그 온도구배로 인하여 상대적으로 큰 인장응력이 발생하고 이로 인하여 응력확대계수 값이 커진다. 그러나 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식으로 구한 응력확대계수 값은 결함면의 열전달 효과를 고려한 직접 K 계산 결과에 비해 최심점에서 각각 11%, 14% 정도 작았다. 따라서 온도변화가 작용하는 하중하에서 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식은 응력확대계수 값에 미치는

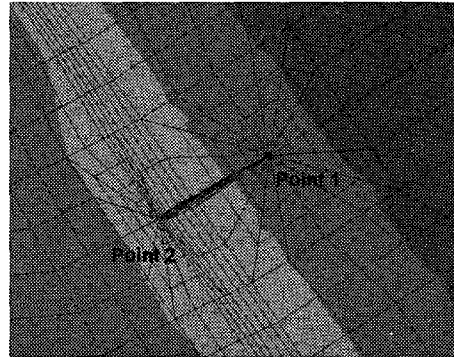


Fig. 13 Temperature distribution without the consideration of heat transfer on crack face

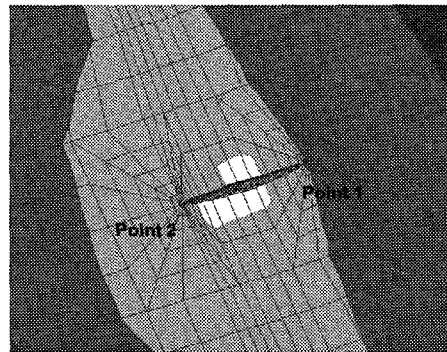


Fig. 14 Temperature distribution with the consideration of heat transfer on crack face

결함면에서의 열전달의 영향을 고려하지 못하는 것으로 판단된다.⁽⁹⁾

5. 결론

본 논문에서는 압력용기 상부 헤드와 노즐의 기하학적 형상을 고려한 응력해석을 수행하고, 그 결과를 ASME Sec. XI 식과 Raju-Newman 식에 적용하여 응력확대계수 값을 구하였다. 또한 직접 K 계산법에 의하여 응력확대계수에 미치는 결함면의 내압과 열전달의 영향을 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 하중조건이 내압인 경우, 결함면에 작용하는 압력을 고려한 직접 K 계산법은 이를 고려하

지 않은 해석에 비하여 13% 정도 큰 응력확대계수를 나타낸다.

(2) 하중조건이 온도변화인 경우, 결합면의 열전달을 고려한 응력확대계수 해석은 이를 무시한 경우에 비하여 결합의 최심점에서는 22%, 표면점에서는 6% 정도 큰 값을 나타낸다.

(3) 노즐부에서의 표면결합에 대한 응력확대계수 계산시 ASME Sec. XI 식은 결합면의 압력의 영향을 고려한 응력확대계수 해석이 가능하나 Raju-Newman 식은 이를 고려할 수 없다. 또한 결합면의 열전달 효과는 두 식 모두 고려하지 못한다.

후 기

본 논문은 한국과학기술연구원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김강수, 김태완, 이규만, 박근배, 1998, "가압기 헤드 및 노즐의 건전성 평가," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (II), pp. 897~902.
- (2) 유영준, 김영진, 1996, "직경이 작은 원자력 배관의 파단전누설해석에 미치는 노즐의 영향," 대한기계학회논문집 제A권, 제20권, 제6호, pp. 1872~1881.
- (3) Raju, I. S. and Newman, J. C. Jr., 1984, "Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels," *Journal of Pressure Vessel Technology*, pp. 293~298.
- (4) ASME Section XI, Division 1, 1995, "Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water Cooled Plants."
- (5) 최성남, 이인철, 장기상, 1998, "원자력 압력용기 안전주입 노즐의 3차원과 축대칭 모델 유한요소해석," 대한기계학회 춘계학술발표회 논문집 (A), pp. 844~849.
- (6) 1998, ABAQUS User's manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (7) Shiratori, M., 1996, "Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Cracks subjected to Arbitrary Distributed Stresses," *Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University*, Vol. 35.
- (8) Shih, C. F., Moran, B. and Nakamura, T., 1986, "Energy Release Rate along a Three-Dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body," *Int. J. Fracture*, Vol. 30, pp. 79~102.
- (9) 김진수, 최재봉, 김영진, 장기상, 최성남, 1998, "가압열충격사고시 클래드 효과가 응력확대계수에 미치는 영향," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 106~112.