

## 노즐의 피로해석에 미치는 용접잔류응력의 영향

김 상 철<sup>\*,†</sup> · 김 만 원<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>세명대학교 공과대학 보건안전공학과

<sup>\*\*</sup>한국수력원자력(주), 중앙연구원

### Effect of Weld Residual Stress on Fatigue Analysis of Nozzle

Sang-Chul Kim<sup>\*,†</sup> and Man-Won Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Occupational Health & Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>\*\*</sup>Central Research Institute, KHNP, Daejeon 305-343, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : sckim@semyung.ac.kr

(Received November 9, 2013 ; Revised December 6, 2013, Accepted January 2, 2014)

#### Abstract

Although the fatigue design curve of ASME Code has enough margin with respect to alternating stress and cycles, the welding residual stress(WRS) should be included in fatigue analysis. In this paper, WRS distribution in a nozzle with dissimilar metal weldment was obtained by finite element analysis and was added in fatigue analysis. The fatigue analysis was performed by following the ASME Code including thermal and stress analysis applying with postulated 30 transient conditions. The calculated results of a cumulative fatigue usage factors(CUF) were compared for the case of the models with or without WRS effects. The results showed that the CUF at weldment and heat affected zone was affected by the WRS.

Key Words : Fatigue analysis, Cumulative usage factor, Dissimilar metal weld, Finite element method, weld residual stress

#### 1. 서 론

피로해석을 하는 이유는 기기가 파손을 일으키지 않고 정해진 횟수만큼의 반복운전을 할 수 있는지를 알아보기 위한 것이다. ASME Boiler & Pressure Vessel Code<sup>1)</sup>의 Section III 에서는 원자력 발전소 구조물의 피로파손에 대한 설계 방법을 제시하고 있다. ASME Code의 해석 방법은 먼저 사용재료에 적합한 설계피로 곡선(design fatigue curve)을 선택하고, 예상되는 사건별로 탄성응력해석을 행하여 반복되는 피크응력강도와 그 반복횟수를 산정한 후, 반복피크응력강도(alternating stress intensity)에 해당하는 허용반복횟수를 설계피로곡선에서 읽어 Miner's Rule에 따라 각각의 부하 사이클에서 피로사용계수(fatigue usage factor)와 누적

피로사용계수(cumulative usage factor; CUF)를 계산하는 것이다. 원자력 구조물 및 기기는 계산된 누적 피로계수의 값이 1을 초과하지 않도록 설계되어야 한다.

원전 구조물을 포함한 산업 구조물에는 많은 용접부가 존재한다. 용접부에 존재하는 용접잔류응력은 작용하중, 균열의 진전 등의 영향으로 응력분포가 복잡하게 변한다. 용접열에 의한 국부적인 취화현상이나 큰 인장 잔류응력으로 소성영역이 존재할 수 있어 평균응력에 영향을 크게 미칠 수 있으며, 용접잔류응력으로 인해 평균응력이 상승하는 경우 피로설계곡선이 아래로 떨어지게 된다. 따라서 큰 용접잔류응력 분포는 피로해석시 고려되어야 할 요소 중 하나이다.

용접잔류응력의 이완 및 이의 평균응력 효과를 고려한 피로수명평가에 관한 연구<sup>2)</sup>와 잔류응력을 이용한 용접이음부의 피로수명 평가 모델에 대한 연구<sup>3)</sup>에서는 용

접잔류응력 효과를 피로한도곡선에 반영하여 평가하는 방법을 사용하였다. 잔류응력 측정값과 유한요소해석을 통해 잔류응력의 영향을 평가한 연구<sup>4)</sup>에서 플러그용접과 링용접시 피로한도는 용접잔류응력을 고려하면 잔류응력을 고려하지 않은 경우에 비하여 각각 32%와 28% 낮아짐을 확인하였다. 동 연구에서는 플러그용접과 링용접 시편으로 피로시험을 수행하고 수정 Goodman 식을 사용하여 피로곡선을 구하였다.

국부취화와 용접잔류응력 효과를 고려한 원자로 출구 노즐 용접부의 피로강도를 평가한 연구<sup>5)</sup>에서는 천이 조건을 적용하여 ASME Code의 방법에 따라 피로해석을 수행하여 누적사용계수에 미치는 용접잔류응력의 영향을 구하였다. 이때 용접잔류응력은 유한요소해석을 통해 구하였으며, 잔류응력을 고려하지 않은 탄성해석에 비하여 잔류응력을 고려한 경우 CUF 값이 약 3.4% 증가하였고, 수정 Goodman 식을 이용하여 평균응력으로 잔류응력효과를 고려한 경우 약 5% 증가하였다.

통상적으로 원전 구조물에서 피로해석시 용접잔류응력은 고려하지 않았다. 그 이유는 ASME Code에서 사용하는 설계피로곡선이 피로시험에서 나오는 모든 데이터들을 포함하면서 많은 불확정성을 고려하여 곡선적합하고, 여기에 응력집폭에 대하여는 2배, 사이클에 대하여는 20배의 안전율을 적용하여 하향시킨 것이기 때문이다. 이 안전율 안에 용접잔류응력에 의한 영향의 정도가 고려되었다고 보며, 용접잔류응력은 안전율에 의한 여유도를 잠식시키는 것이지 실제 피로한도를 초과한다고 보지 않는 것이다.

ASME Code의 피로해석은 해석 위치의 반복 피크 응력강도와 횡수로 계산하므로 기하학적 불연속부나 국부적으로 큰 응력은 피로계수 값을 증가시키게 된다. 원전의 노즐은 이종금속 용접부나 그 근처에서 기하학적 불연속부가 나타나는 경우가 대부분이다. 따라서 이종금속 용접부에서 용접잔류응력과 작용하중에 의해 응력강도차가 크게 발생하는 위치를 선정하여 피로해석을 해야 한다.

본 논문에서는 기하학적 불연속부가 존재하는 이종금속 용접부를 가진 노즐에 대하여 천이 온도하중과 작용하중을 고려하여 용접잔류응력이 피로해석에 미치는 영향을 살펴보았다. 이때 용접잔류응력을 먼저 유한요소해석을 통해 계산한 후 용접잔류응력분포를 갖는 모델에 피로하중을 가하여 피로해석을 수행하였다. 잔류응력을 평균응력으로 계산하여 피로한도에 적용하지 않고 ASME Code의 설계피로수명곡선을 그대로 사용함으로써, ASME Code를 따라 평가하였을 때 용접잔류응력이 누적피로계수 값에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 용접잔류응력 해석

### 2.1 유한요소 모델링

용접잔류응력 분포를 계산하기 위하여 실제 원자력발전소의 가압기 상부헤드의 노즐을 대상으로 축대칭 유한요소해석모델을 작성하고 용접 열전달해석과 열응력 해석을 수행하였다. 유한요소해석 모델의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 유한요소모델은 노즐부(SA-508), 이종금속 용접금속(Alloy182), 버터링부(Alloy82), 배관(Type 304 스테인리스강), Clad(Type 304 스테인리스강)로 이루어져 있다. 이종금속 용접부 노즐의 반경은 65.913mm 이며 용접부에 연결된 안전단의 두께는 29.718mm 이다. 버터링은 미리 용접되었고 잔류응력이 없는 상태로 가정하였으며, 용접패스는 총 7개이다. Fig. 1에 용접부 상세 격자형상과 용접패스 순서를 나타내었다.

유한요소 모델링과 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS<sup>6)</sup>를 사용하였다. 용접부의 유한요소격자 모양과 용접패스를 Fig. 1에 나타내었다. 용접 열전달과 응력해석을 위해 용접부는 세밀하게 요소격자를 배치하였다. 열전달 해석을 위해 축대칭 열전달요소인 PLANE55를 사용하였으며, 잔류응력해석을 위해 축대칭 요소인 PLANE42를 사용하였다. 유한요소모델의 총 요소 수는 1480개이며 총 절점 수는 1592개이다.

유한요소해석은 천이 열전달해석과 응력해석을 순차적으로 수행하였다. 먼저 열전달해석을 수행하여 절점 온도를 계산하고, 계산된 절점온도를 입력하여 열응력 구조해석을 수행하였다. 용접 현상을 모사하기 위해 요소 추가 및 제거 방법(element birth and death method)을 사용하였다. 즉, ANSYS의 EKILL 및 EALIVE

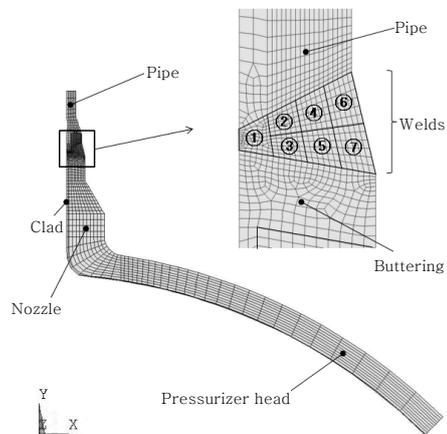


Fig. 1 FE mesh and weld pass-profiles of dissimilar metal weld

명령어를 사용하여 순차적으로 용접비드가 용입되는 현상을 모사하였다. 용입되는 용접비드의 초기온도는 용접재의 용융온도를 고려하여 약 1650°C 로 하였다. 용접하는 동안 모델의 내면과 외면 및 EKILL 명령어로 제거한 요소의 표면에는 열전달계수를 적용하여 표면으로부터 대기로의 대류열전달을 고려하고, 용접비드의 공기와 접촉부에는 복사열전달 조건을 적용하였다. 배관 끝단과 가압기 대칭면에는 단열조건을 적용하였다.

보통 Alloy 82/182 용접은 초층이나 2~3째 용접층(두꺼운 노즐의 경우)을 GTAW(gas tungsten arc welding)로 수행하며 이때 용가재(fillar metal)는 ER-NiCr-3(Alloy 82)이 사용되며, 이후 용접층들은 SMAW(shielded metal arc welding)로 수행하며 용가재는 E-NiCrFe-3(Alloy 182)을 사용한다. 원자력 발전소의 용접작업에서는 용접 품질확보를 위해 용접절차시방서가 구비되어 있다. 본 논문에서는 용접절차시방서의 용접방법과 용접조건 및 입열량 등을 실제로 반영하는 대신에 미국 전력연구원(EPRI)의 Alloy 82/182 용접잔류응력 평가 해석방법<sup>7,8)</sup>과 동일한 방법을 사용하여 용접 열전달해석을 수행하였다. 즉, 용접 가열시 용접비드 요소의 최대온도는 약 1650 ~ 1800°C 가 되도록 하였고 이전 용접층의 바닥부분이 약 5400°C 정도가 되도록 하였다. 냉각시에는 용접비드의 표면과 모델의 모든 표면에 대류 열전달 조건을 적용하여 자연 냉각이 되도록 하였다. 각 용접패스 사이에는 충분한 냉각이 이루어질 수 있도록 냉각시간을 두어 층간온도가 약 175°C 정도가 되도록 하였다.

응력해석에서는 가압기 대칭면을 구속하고 열전달해석 결과를 순차적으로 불러들여 해석하였다. 응력해석시 가압기 헤드부의 대칭면은 대칭방향으로 구속하였으며 노즐의 끝단은 축방향 변위를 허용하였다.

용접 열전달해석과 응력해석에 사용된 물성치는 Fig. 2 ~ Fig. 8과 같다<sup>9)</sup>.

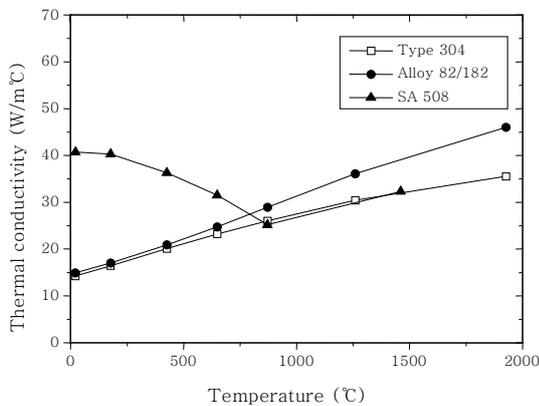


Fig. 2 Physical property : thermal conductivity

## 2.2 잔류응력 분포

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 유한요소해석 결과 얻어진 용접부와 그 주변의 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것으로, 단위는 ksi (1ksi = 6.895MPa)이다. 용접부의 축방향 잔류응력분포는 최대값이 초층 용접부에서 발생하였으며, 노즐 외면의 기하학적 불연

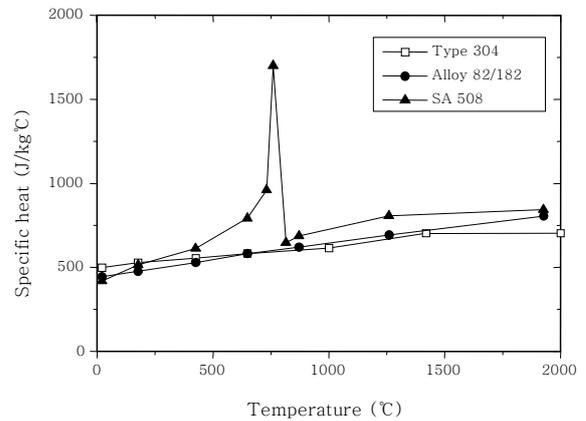


Fig. 3 Physical property : specific heat

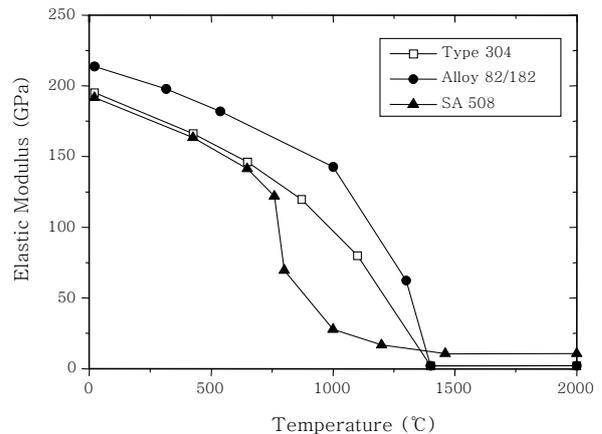


Fig. 4 Material property : elastic modulus

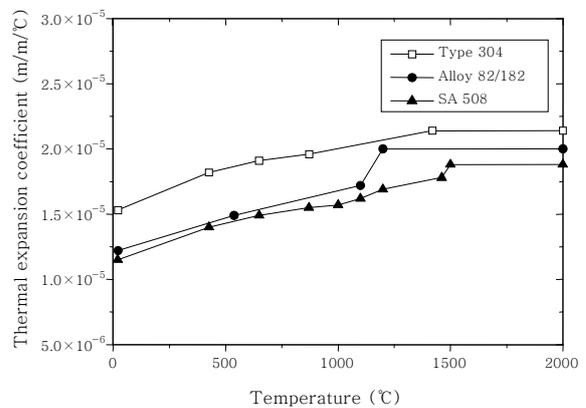


Fig. 5 Material property : thermal expansion coefficient

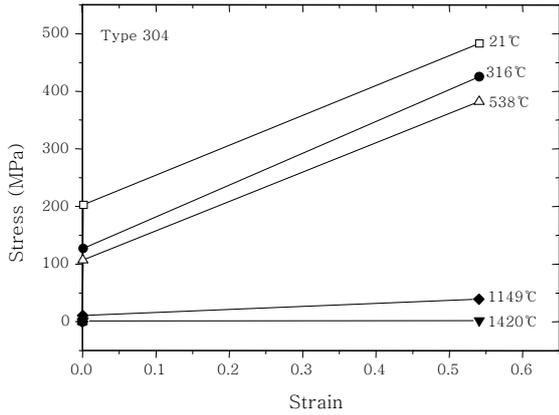


Fig. 6 Stress-strain curve for type 304 material

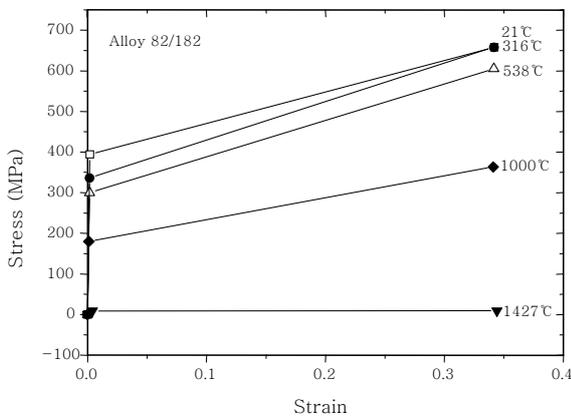


Fig. 7 Stress-strain curve for Alloy 82/182 material

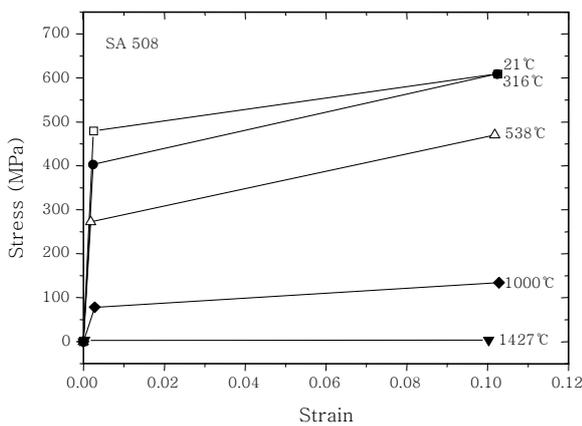


Fig. 8 Stress-strain curve for SA 508 material

속부에서 최소값이 나타났다. 용접재에서는 내면으로부터 인장-압축-인장의 분포를 나타내었다. 원주방향 잔류응력의 최대값은 배관재의 열영향부에서 발생하였으며 축방향 잔류응력 최대값에 비하여 약 150% 정도이며 상온 항복응력의 약 175% 정도이다. 이들 최대 응력값은 EPRI MRP<sup>7,8)</sup>의 여러 유사한 이중금속 용접부

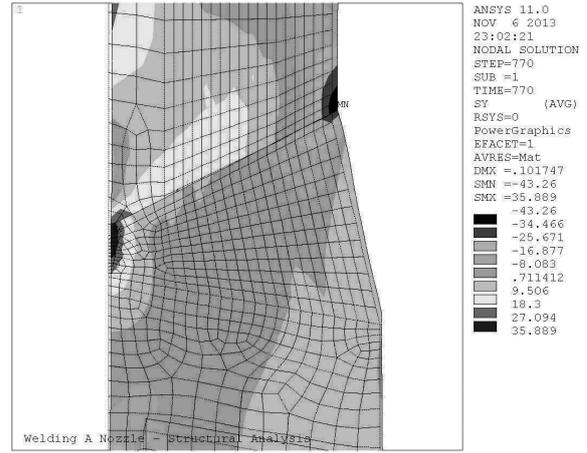


Fig. 9 Axial stress distribution in as weld

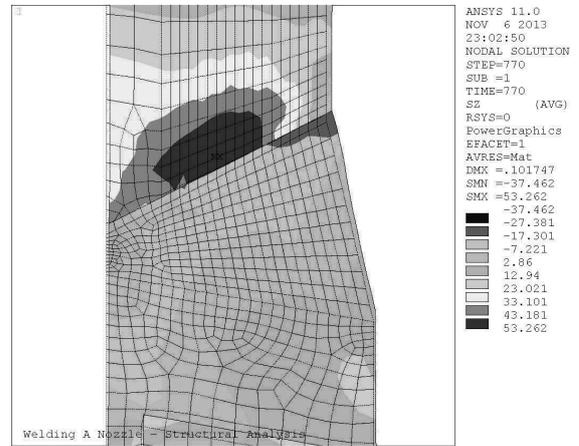


Fig. 10 Circumferential stress distribution in as weld

노즐형상에서 나타난 잔류응력 최대값과 잘 일치한다.

원주방향 잔류응력의 경우 용접재와 배관재가 연결된 부분에서 응력분포의 값이 급격히 변하였고, 용접부에서 최대 및 최소 응력이 나타났다. 따라서 피로해석 위치 선정시 이 부분을 고려해야 할 것이다.

### 3. 피로해석

#### 3.1 천이해석 및 피로해석 방법

피로평가를 위한 천이해석(transient analysis)은 가압기 노즐에 가해지는 온도, 압력, 유량의 변화를 실시간으로 해석하는 것이다. 천이해석을 위한 유한요소 모델 및 재료물성치는 용접잔류응력 해석의 경우와 동일하게 하였다. 유한요소 모델링과 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS<sup>6)</sup>를 사용하였다. 원자력발전소의 가압기 상부헤드 노즐 부분의 온도, 압력,

유량은 상세 설계 데이터이므로 본 논문에서는 사용하지 못하고, 선행연구<sup>5)</sup>의 피로해석에 사용된 천이조건을 참고하여 천이조건을 임의로 생성하여 사용하였다. Table 1은 천이조건과 초기온도, 발생횟수를 나타낸 것으로 정상(Normal)조건 18건, 시험(Test)조건 2건, 이상(Upset)조건 7건으로 가정하였다. 피로 Event는 Table 1의 27건에 안전지진정지(SSE) 하중, 증기 방출(Table 2에서 Ex로 표기), 제로하중의 3가지 조건을 더하여 총 30건으로 하였다. 여기서 제로하중은 상온에서 내압이 작용하지 않는 하중조건을 의미하며, 반복피크응력과 해당 Cycle 계산시 Event 조합에 사용된다.

피로해석 위치에 해당하는 CUT을 설정하고, Table 1의 각 천이조건 마다 천이 열전달 해석을 수행하여 시간에 따른 온도변화를 결과 파일에 저장한 다음, 후처리작업을 통해 각 해석 위치(CUT)에서 가장 큰 온도차를 나타내는 천이시간을 구하고 천이 압력하중과 조합하여 열전달해석 결과를 불러들여 열응력 해석을 수행한다. 피로해석을 위한 열전달 해석에서 모델의 외표면은 보온재에 싸여 있으므로 단열조건을 적용하였다. 실제 제작시 용접부는 용접공정 종료후 상온까지 온도가 내려간 후 Table 1의 각 천이조건에 대한 온도하중이 가해지므로, Table 1의 천이조건으로 해석한 열응

**Table 1** List of transients employed in fatigue analysis

Type	Name	Transients	Initial Temp. [°C]	Occurrence (60 years)
Normal	N1A	Steady State Operation (Increase)	264	1500000
	N1B	Steady State Operation (Decrease)	270	1500000
	N2A	Daily Load Follow Operation (From 100% to 50%)	270	22000
	N2B	Daily Load Follow Operation (From 50% to 100%)	247	22000
	N3A	Turbine Step Load Change in the Increasing Direction	228	6400
	N3B	Turbine Step Load Change in the Decreasing Direction	230	6400
	N3CA	Large Turbine Load Step Decrease	270	150
	N3CB	Large Turbine Load Step Decrease	270	60
	N3CC	Large Turbine Load Step Decrease	270	210
	N4A	Turbine Ramp Load Change in the Increasing Direction	192	6400
	N4BA	Turbine Ramp Load Change in the Decreasing Direction	270	3200
	N4BB	Turbine Ramp Load Change in the Decreasing Direction	270	60
	N5	Non-Load Change Events (Planned)	237	13600
	N5A	Opening or Closing of Economizer Feedwater Control Valve	221	13600
	N6	Non-Load Change Events (Unplanned)	269	360
	N7	Plant Events below Power Operation	202	2820
	N8	Plant Heatup	21	300
	N9	Plant Cooldown	292	300
Test	T1A	RCS Hydrostatic Test (Increase)	16	15
	T1B	RCS Hydrostatic Test (Decrease)	135	200
	T2	LeakTest(1)		
Upset	U1	Increase in Heat Removal by the Secondary System	271	70
	U2	Decrease in Heat Removal by the Secondary System	269	80
	U3	Decrease in RCS Flow Rate	268	30
	U4A	Reactivity and Power Distribution Anomalies	209	60
	U4B	Reactivity and Power Distribution Anomalies	270	60
	U5	Increase in RCS Inventory	270	20
	U6	Decrease in RCS Inventory	270	30

력과 2.2절에서 구한 용접잔류응력 분포를 중첩하여 구조해석을 수행하여 최종 응력분포를 구한다.

각 CUT 위치에서의 응력분포를 선형화하여 등가 선형응력분포를 구하고, 적절한 압력, 외부 노즐하중, 열응력 해석결과를 중첩하여 1차 + 2차 응력성분과 1차 + 2차 응력강도범위를 계산한다.

총응력(total stress)은 1차 + 2차 응력에 피크응력(peak stress)를 더하여 구한다.

$$S_i = k_i \times (P + Q) + Peak \tag{1}$$

여기서 하첨자 i는 원통좌표계의 반경방향, 축방향, 원주방향을 나타내며,  $k_i$ 는 각 방향의 응력집중계수, P는 1차 응력, Q는 2차 응력을 나타낸다. 총응력은 내압 + 온도 + 외부노즐하중에 기인한 것이다.

각 하중조건마다 총응력을 계산한 후, 반복피크응력강도를 ASME Code Sec.III NB-3216.2에 따라 식 (2)와 같이 계산한다.

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \alpha S_p \tag{2}$$

여기서  $S_p$ 는 피크응력강도 범위이며,  $\alpha$ 는 ASME Code Sec.III NB-3222.4(e)(4)에 정의된 탄성계수의 비이다.

피로사용계수는 각 CUT의 양단 절점에서 ASME Code Sec.III NB-3222.4(e)에 따라 계산한다. 각 CUT의 해석위치별로 각 유형의 응력 사이클에 대하여 각각의 피로사용계수 값을 모두 더하면 누적피로사용계수(CUF)가 된다.

$$U = \sum_{S_{alt}} (n/N) < 1.0 \tag{3}$$

여기서 n은 반복피크응력강도에 대하여 수명기간동안 발생하는 횟수이며, N은 ASME Code Sec.III의 Fig. I-9.1과 I-9.2로부터 구해지는 허용 발생횟수이다.

Fig. 11은 각 CUT 위치를 나타낸 것으로, 통상적으로 설정하는 위치인 CUT-A, CUT-C, CUT-D와 Fig. 9 및 Fig. 10의 잔류응력분포를 고려하여 CUT-B를 설정하였다. CUT-B와 CUT-C는 용접잔류응력의 영향범위 안에 포함된 위치이다. 각 CUT에 대하여 노즐 내면의 절점에서는 모든 응력성분 방향으로 응력집중계수 1.0을 부가하였으며, 외면 절점에 대하여는 원주방향으로 1.2를 부가하고 다른 응력성분 방향으로는 1.0을 부가하였다. 응력집중계수는 해당 형상에 대하여 알려진 계산방법<sup>10)</sup>을 사용할 수 있으나, 본 논

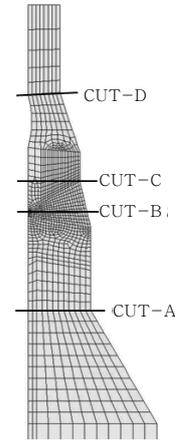


Fig. 11 Cut locations for fatigue analysis

문에서는 유한요소해석 결과가 해당 CUT 부위의 형상의 영향을 어느 정도 반영하므로, 계산의 편의상 원주방향에 대하여만 1.2를 곱하여 약간의 보수성을 추가하도록 하였다.

외부하중으로는 노즐하중과 Blow-off 하중을 가하였다. 노즐하중은 Table 2와 같이 자중(DW), 정상운전(NOP), 안전지진정지(SSE), 정상운전+증기방출(NOP+Ex)의 4 가지 경우를 적용하였다. Table 2의 노즐하중은 원전의 실제 설계 데이터가 아니라 해석을 위해 적절히 가정된 값이다. 노즐하중은 최대값과 최소값이 ±(Table 2의 값)으로 가하였다. 하중 Fa, Fb, Fc와 모멘트

Table 2 Nozzle external loads

Load Case	Fa (kN)	Fb (kN)	Fc (kN)	Ma (kNm)	Mb (kNm)	Mc (kNm)
DW	1.82	12.63	0.44	0.20	0.14	8.37
NOP	9.96	23.86	3.93	13.93	3.22	26.01
SSE	12.46	34.46	18.81	19.22	7.55	25.71
NOP+Ex	10.73	26.60	5.27	15.22	3.77	27.99

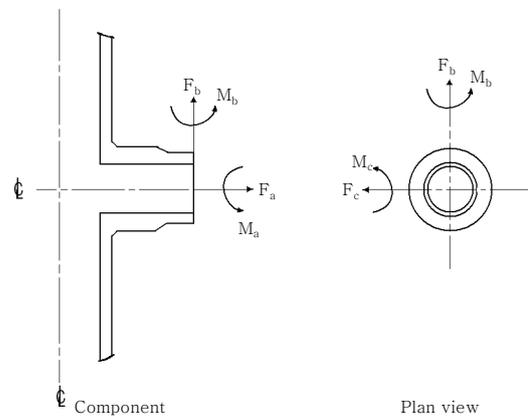


Fig. 12 Axis of nozzle load

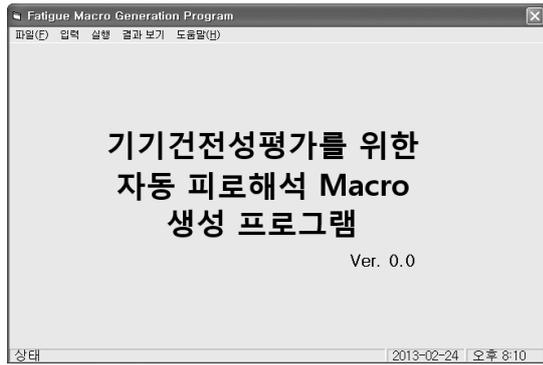


Fig. 13 Fatigue macro-file generation main GUI

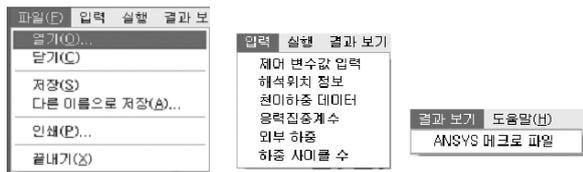


Fig. 14 Sub-menus of main GUI menu

Ma, Mb, Mc의 양의 방향은 Fig. 12와 같다. Blow-off 하중은 배관 끝단에 다음 식 (1)과 같이 가해지는 하중이다.

$$F_{blow-off} = \frac{-\pi R_i^2 P}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (4)$$

여기서 Ri 는 배관의 내반경, Ro은 배관의 외반경, P는 내압을 나타낸다.

본 연구에서는 전문화된 피로해석의 복잡한 과정을 ANSYS에서 쉽게 수행하기 위해 피로해석 매크로(Macro)를 자동으로 생성할 있도록 프로그램을 개발하여 사용하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 자동 피로해석 매크로생성 프로그램의 초기화면과 주 메뉴의 모습을 나타낸 것이다. 프로그램은 제어변수, 해석위치, 천이하중 데이터, CUT 별 응력집중계수, 외부노즐하중, 하중사이클수 등을 입력받아 ANSYS 매크로 파일을 생성한다.

### 3.2 피로평가 결과

피로평가는 동일한 유한요소 모델에 대하여 용접잔류응력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대하여 해석하였고, 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 S.C.F는 응력집중계수(stress concentration factor)를 의미한다. 용접잔류응력을 고려하는 경우(with WRS) CUT-B의 내면 절점에서 높은 CUF 값이 나타났다. 이 지점은 Fig. 9 및 Fig. 10에서 보듯

Table 3 Cumulative usage factor

CUT	Node Location	S.C.F	Cumulative usage factor	
			without WRS	with WRS
A	ID	1.0	0.39326	0.45312
	OD	1.2	0.04347	0.02082
B	ID	1.0	0.00000	1.26186
	OD	1.2	0.00000	0.20768
C	ID	1.0	0.00015	0.12714
	OD	1.2	0.00000	0.00304
D	ID	1.0	0.00420	0.00045
	OD	1.2	0.00000	0.00058

이 높은 잔류응력이 발생하는 지점이다. CUT-C의 내면에서도 잔류응력을 고려하는 경우 CUF 값에 뚜렷한 차이가 나타났다. CUT-A는 직접적인 용접잔류응력의 분포 부분은 아니지만 노즐 외면의 형상의 기하학적 불연속과 클래드 부분의 재질 영향으로 CUF 값의 차이가 나타난 것으로 판단된다. CUT-D에서는 영향이 미미하였다.

용접잔류응력 해석시 본 논문에서는 배관 끝단을 구속하지 않았고 한 가지 경우의 노즐형상에 대하여 모델링하였으나, 용접잔류응력의 분포는 배관 끝단의 구속조건과 노즐 및 용접부 형상에 따라 달라질 수 있다. 또한 원전의 실제 설계에 사용된 천이하중 및 이벤트 조건을 적용하지 않고 가정하여 사용하였으므로 CUF 값 자체는 의미가 없다. 다만, 이중금속 용접부에서는 재질, 용접잔류응력 분포, 기하학적 불연속의 영향이 복합적으로 나타나며, 피로해석시 용접잔류응력은 고려되어야 함을 알 수 있다.

ASME Code의 피로해석 방법은 반복피로응력강도를 피로설계곡선에 비교하여 수명을 평가하는데, 피로설계곡선이 응력진폭에 대하여는 2배, 사이클에 대하여는 20배의 안전율을 적용하므로 보수적이긴 하지만, 본 논문의 결과를 보면 용접잔류응력이 용접부에서 CUF에 큰 영향을 미칠 수도 있음을 알 수 있다. 이중금속 용접부와 기하학적 불연속부를 가진 노즐은 용접잔류응력이 복합적으로 작용되므로 체계적인 상세 평가를 통하여 용접잔류응력의 영향을 살펴볼 필요성이 있다고 판단된다.

## 4. 결 론

이중금속 용접부를 가진 노즐의 피로해석시 용접잔

류응력의 영향을 피로해석을 통해 살펴보았다. 해석을 위해 용접과정을 유한요소해석을 통해 모사하여 용접잔류응력분포를 얻었으며, 용접잔류응력이 존재하는 경우의 피로해석을 수행하고 용접잔류응력이 존재하지 않는 경우와 비교하여 잔류응력이 피로사용계수에 미치는 영향을 살펴보았다.

용접부에 설정한 피로해석 위치에서 용접잔류응력은 CUF에 영향을 미쳤다. 용접부에 설정한 CUT의 내면 절점에서 높은 용접잔류응력으로 인해 높은 CUF 값이 얻어졌다. 따라서 실제 원전의 피로해석 시 정확한 노즐 형상과 재질, 천이조건, 외부노즐하중 뿐만 아니라 용접잔류응력의 영향을 고려하여야 함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 세명대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## Reference

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.III, Nuclear Reactor Vessels, American Society of Mechanical Engineers, NY, (2010)
2. S.H. Han, J.W. Han, B.C. Shin and J.H. Kim : Fatigue Life Estimation of Welded Components considering Welding Residual Stress Relaxation and Its Mean Stress Effect, Journal of KSME A, **27**(2003), 175-182 (in Korean)
3. B.C. Goo and S.Y. Yang : Fatigue Life Evaluation Model of Welded Residual Stress, Journal of KSME A, **28**(2004), 1328-1336 (in Korean)
4. S.Y. Baek : Fatigue Life Evaluation on Compressive & Tensional Residual Stress Induced Materials and Residual Stress Measurement using Fole Drilling Method, Journal of KWJS, **31**(2013), 43-48 (in Korean)
5. S.H. Lee : Fatigue Assessment of Reactor Vessel Outlet Nozzle Weld Considering the LBZ and Welding Residual Stress Effects, Journal of KWS, **24**(2006), 48-56 (in Korean)
6. Fatigue Analysis in Structural Analysis Guid, Release 11 Documentation for ANSYS, ANSYS, Inc.
7. EPRI Report MRP-114 : Evaluation of the Effect of Weld Repairs on Dissimilar Metal Butt Welds (MRP-114), EPRI, Palo Alto, CA: 2004. 1009559.
8. EPRI Report MRP-106 : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI, Palo Alto, CA: 2004. 1009378
9. S.C. Kim and M.W. Kim : Crack Growth Analysis of Dissimilar Metal Weld Using a Numerical Method, J. of KWJS, **28-1**(2010), 100-106 (in Korean)
10. R.E. Peterson : Stress Concentration Design Factors, John Wiley and Sons, Inc.