원전 CEDM 노즐의 밀봉보수용접시 발생하는 잔류응력에 대한 해석적 연구

강종호^{*,**} · 정윤교^{*} · 장윤찬^{**} · 이재봉^{***} · 이원근^{***} · 조영태^{*,†}

^{*}창원대학교 메카트로닉스대학 기계공학부

^{**}두산중공업 원자력 사업부

^{***}두산중공업 기술연구원

An Analytical Study on the Residual Stress Generated by Seal Weld Repair of CEDM Nozzle in the Nuclear Power Plant

Jong-Ho Kang^{*}, Yoon Gyo Jung^{*}, Yun-Chan Jang^{**}, Ja-Bong Lee^{***},
Won-Geun Yi^{***}, and Young Tae Cho^{*,†}

^{*}Dept. of Manufacturing Engineering, Changwon National Univ., 51140, Korea

^{**}Nuclear Business Group, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd., Changwon, 51711, Korea

^{***}Corporate R&D Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd., Changwon, 51711, Korea

[†]Corresponding author : ytcho@changwon.ac.kr

(Received December 20, 2017 ; Revised January 10, 2018 ; Accepted February 2, 2018)

Abstract

The reactor vessel closure head has many CEDM nozzles through which the control element drive mechanisms pass. The CEDM nozzle weld region of the reactor vessel closure head is composed of Alloy 600 material. It has been found that cracks occur due to the high stress generated during normal operation of the nuclear power plant and the contact environment with the primary cooling water. Seal Weld Repair blocks the environmental factor that may causes primary water stress corrosion cracking(PWSCC) by covering Alloy 600 weld region which is susceptible to PWSCC with Alloy 690 resistant to the stress corrosion cracking. In this study, a finite element analysis was performed to evaluate the effect of residual stress formation by seal weld repair in the nuclear power plant CEDM nozzle. The thickness of the welded structure and the number of welded layers were considered as variables. As a result, we showed that seal weld repair for J-groove weldment of CEDM nozzle can release the tensile residual stress so that the possibility of occurrence of PWSCC can be reduced. Also, it has shown that a multi-layer is more effective and thicker weld bead is more secured for reducing residual stresses in J-groove weld.

Key Words : CEDM nozzle, PWSCC, Residual stress, Seal weld repair, Alloy 600

1. 서 론

원자로의 CEDM(Control Element Drive Mechanism) 노즐 용접부에는 주로 Alloy 600 소재가 사용되는데 원전 가동중 발생하는 높은 응력 및 일차수와의 장시간 접촉으로 인해 균열이 발생하는 현상이 발견되

었다. 이는 일차수응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)이라고 알려져 있는 현상이다. 운전 중인 발전소 부품에서 최초의 일차수응력부식균열 사례는 1971년 Obrigheim 발전소 증기발생기 고온관에서 발견된 균열로 알려져 있다. 그 후 세계 여러 발전소의 배관 및 노즐 용접부에서 일차수 응력부식균열이 보고되었으며 이러한 균열은 원자로의 안전성

에 매우 큰 영향을 주기 때문에 그 원인을 파악하고 발생을 억제하거나 보수 용접을 통해 문제를 해결해야 한다. 원전 주요 부품의 안전성을 확보하기 위해 노즐 용접부와 관련된 많은 연구가 진행되었는데 일차수 응력 부식균열을 발생시키는 주요 원인 중 하나인 용접부 잔류응력에 대하여 원전 CRDM(Control Rod Drive Mechanism) 노즐 용접부와 가압기 이중금속용접부를 대상으로 하는 연구가 주를 이루고 있다. 원전 정상가동조건 적용 방식이 상부헤드 관통 노즐의 잔류응력에 미치는 영향을 분석한 연구¹⁾에서는 원전 가동주기의 반복이 잔류응력에 미치는 영향은 미미하다는 것을 확인하였고, CRDM 노즐 용접부의 잔류응력 및 운전응력을 평가한 연구²⁾에서는 J-홈 용접에 의해 가장 큰 인장응력이 형성되는 지점을 확인하였다. CRDM 노즐 용접부의 보수용접 영향을 분석한 연구³⁾에서는 보수용접 길이, 깊이, 폭 등의 변수에 따른 잔류응력의 변화 경향을 확인하였고, 유한요소 변수 민감도 해석을 수행한 연구^{4,5)}에서는 입열방법, 비드형상, 경계조건, 요소의 크기, 용접순서, 관통노즐의 두께 및 형상비 등이 유한요소해석 결과에 미치는 영향을 확인하였다. CRDM 노즐 형상이 잔류응력에 미치는 영향을 분석한 연구⁶⁾에서 노즐 위치에 따른 잔류응력 크기의 변화 경향을 확인하였고, 용접잔류응력이 노즐의 피로해석에 미치는 영향을 분석한 연구⁷⁾에서는 내면의 높은 용접잔류응력으로 인해 높은 누적피로사용계수(Cumulative Usage Factor, CUF) 값이 얻어진다는 것을 확인하였다. 가압기 이중금속용접부의 예방 용접 Overlay가 잔류응력에 미치는 영향을 분석한 연구^{8,9)}에서는 Overlay 용접의 용접잔류응력 완화효과를 확인하였다. 가압기 노즐의 용접잔류응력 해석 변수를 분석한 연구¹⁰⁾에서는 과도한 구속조건에서 낮은 잔류응력이 분포하고 얇은 노즐 형상이 될수록 열응력 및 변형이 크게 발생하는 것을 확인하였다. 가압경수로 노즐 맞대기 이중금속용접부의 용접잔류응력을 예측한 연구¹¹⁾에서는 유한요소해석을 통해 일반적으로 적용 가능한 잔류응력 분포식과 두께 변화에 따른 잔류응력 변화가 미미함을 확인하였고, 피로균열의 전파에 따른 잔류응력 재분포에 대한 해석을 수행한 연구¹²⁾에서는 유한폭판의 경우 균열선단 전방에는 항상 인장잔류응력의 집중이 발생하는 것을 확인하였다. 가압기 노즐의 보수용접에 따른 이중금속 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구¹³⁾에서는 이중금속 용접부 내면의 보수용접이 축방향 및 원주방향의 응력을 증가시키고, 응력확대계수 계산 결과 두께의 40%까지 균열이 성장할 수 있다는 것을 확인하였다.

원전 CEDM 노즐 용접부는 일차수응력부식균열에

Fig. 1 The schematic of seal weld repair(SWR)

취약한 Alloy 600 재료로 구성되어 있고, 부식을 유발할 수 있는 일차수와 접촉하고 있으며, J-Groove 용접으로 인한 인장잔류응력을 갖고 있다.

밀봉보수용접(Seal Weld Repair, SWR) 기술은 Alloy 600 부분을 일차수 접촉 환경으로부터 직접 차단하여 일차수 응력부식균열의 발생을 억제하는 방법이다. Fig. 1에 SWR 기술을 적용하는 개략적인 모습을 나타내었다. SWR 기술은 Alloy 600 소재의 용접부가 일차수와 직접 접촉하는 것을 차단함으로써 용접부의 균열 발생 가능성을 예방할 뿐만 아니라, 균열이 발생했을 시 균열의 성장기구를 일차수 응력부식균열에서 피로균열에 의한 성장으로 변화시켜 성장속도를 억제하므로 해당 부위의 수명을 연장시킬 수 있다.

본 논문에서는 유한요소해석을 통해 SWR을 적용하기 이전과 적용한 이후에 대하여, 원자로 정상 운전 시작 이전 J-Groove 용접 이후의 시점과 정상 운전 시작 이후 충분한 시간동안 가동한 시점에서의 잔류응력 결과를 분석하였다. 또한 SWR 적용 시 덧씌움 용접구조물의 두께와 용접 층수에 따른 잔류응력분포 변화 경향을 분석함으로써 SWR을 적용하기 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소해석 모델

본 연구에서는 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS¹⁴⁾를 사용하였다. CEDM 노즐의 유한요소해석 모델은 면대칭으로 간주하여 Fig. 2와 같이 3차원 1/2 대칭 해석 모델을 사용하였다. CEDM 노즐 J-Groove 용접부와 덧씌움 용접구조물은 Fig. 3에서와 같이 모든 용접 비드가 원주방향으로 45도씩 4회에 걸쳐 쌓여가는 형상이다. J-Groove 용접부는 총 5개 층으로, 덧씌움 용접구조물은 총 3개 층의 용접 비드로 구성되어 있으며, 덧씌움 용접구조물은 한 층당 3mm씩 총 3개 층, 9mm의 두께로 모델링 되어 있다.

본 연구에 사용된 해석 모델은 원자로 상부헤드, CEDM 노즐, 버터링 및 용접부, 클래드로 구성되어 있다. 원자

Fig. 2 The finite element model of CEDM nozzle

Fig. 3 Modeling of weld beads for SWR

로 상부헤드는 SA 508, CEDM 노즐은 Alloy 690, 버터링 및 용접부는 Alloy 82/182, 클래드는 Stainless Steel TP 316 소재이다. 용접 해석시에는 용접 재료가 매우 높은 온도까지 변화하므로 재료의 넓은 범위에 대한 물성치 정보를 사용하게 된다. 열전도도, 비열, 열팽창 계수를 Fig. 4부터 Fig. 6까지 제시하였으며 이 정보는 문헌¹⁵⁾을 참고하였다.

2.2 용접잔류응력 해석 방법

용접잔류응력 해석을 수행하기 위해 먼저 열전달 해석을 통해 온도분포를 파악하여 열응력을 산출하였다. 용접시 비드가 쌓여지는 것을 모사하기 위해 ABAQUS

Fig. 4 Thermal conductivity¹⁵⁾

Fig. 5 Specific heat¹⁵⁾

Fig. 6 Coefficient of thermal expansion¹⁵⁾

의 기능 중 Element removal 기능과 Element reactive 기능을 사용하여 해석 모델에서 비드를 생성시켰다. 먼저 한개의 비드를 모델에서 활성화시키고, 이 비드를 구성하고 있는 모든 절점에 용접재료의 용융온도인 1383℃를 초기온도로 정의해 준 다음, 비드의 용착온도를 1700℃로 가정하여, 이 온도까지 Heating 해주었다. 이 때 해석모델상의 절단면은 단열되어 있고, 상

Fig. 7 Boundary conditions in CEDM nozzle model

부헤드와 CEDM 노즐의 표면은 자연대류를 적용하였으며(25°C , $10\text{W/m}^2\text{C}$), 비드의 Heating이 끝나고 나면 비드를 Cooling 시켰다. ABAQUS의 Element Removal 기능과 Element Reactive 기능을 사용하면 활성화된 Element에만 열적 영향이 가해지고, 비활성화된 Element는 열적 영향을 전혀 받지 않는다. 이 과정을 모든 용접 비드에 대해서 순차적으로 적용하였다.

열전달 해석 수행 결과로 얻은 온도 분포 이력을 구조 해석 수행에 이용하였다. 구조 해석 수행시에도 열전달 해석시와 마찬가지로 Element Removal, Reactive 기능을 사용하여 용접 비드를 순차적으로 활성화시키고, 비드의 Heating - Cooling 작업을 반복 수행하였다. 이 때 각 단계마다 활성화되는 비드에는 열전달 해석에서의 같은 단계에 해당하는 Load Step의 온도 분포 결과를 읽어서 정의해 주었으며, 원자로 정상 운전 압력을 적용하였다. 정상 운전 이전, J-Groove 용접 과정까지의 구조 해석시 적용한 경계조건은 Fig. 7과 같다. 면대칭 경계조건을 적용했고 상부헤드 밑면의 자유도를 구속하였으며, 열전달 해석 결과인 온도분포 이력을 적용하였다. 정상 운전 시의 구조 해석 경계조건은 Fig. 7의 조건에 내압과 Blow off load를 추가로 적용하였고, 정상 운전 시의 온도를 균일하게 적용하였다.

3. 유한요소해석 결과

본 논문에서는 CEDM 노즐 용접부를 밀봉용접 했을 때, 잔류응력 측면에서 어떠한 영향을 미치는가를 확인하기 위해 균열 발생의 지배적인 원인이 되는 원주방향 응력에 대해서 잔류응력분포를 산출하였다. 구조 해석의 결과로 원주방향, 축방향, 반지름 방향 응력 성분이 산출되는데, Fig. 8에서와 같이 축방향과 반지름 방향에서는 원자로 운전 중 발생하는 내압이 용접부에서 발생 가능한 균열이 닫히는 방향으로 작용하므로, 실제로

Fig. 8 The direction of stress components

Fig. 9 The path of residual stress analysis

발생 가능성이 높은 균열은 원주방향 응력에 의한 것이다.

용접잔류응력을 산출한 경로는 Fig. 9와 같으며, Path 1은 0도 방향의 용접부에서 노즐과 용접부가 맞닿는 수직경로를, Path 2는 180도 방향의 용접부에서의 수직경로를 나타낸다. SWR을 수행하기 전과 후의 J-Groove 용접부 잔류응력을 비교하였고, 덧씌움 용접구조물의 두께와 용접층수를 용접변수로 하여 이에 따른 잔류응력의 분포 경향을 분석하였다.

3.1 SWR 적용 전후의 잔류응력 비교

SWR의 적용 전과 적용 후의 형상을 Fig. 10에서 보여 주고 있다. 여기에서 SWR 적용 전이라 함은 CEDM 노즐의 J-Groove 용접을 수행한 직후의 상태로서, 노즐 용접부에 SWR 적용을 위한 덧씌움 용접이 수행되지 않은 상태를 의미한다. 그리고 SWR 적용 후라 함은 CEDM 노즐의 J-Groove 용접부에 덧씌움 용접을 수행한 상태를

Fig. 10 Before and after application of SWR

의미하는데, 이로 인해 노즐 용접부의 Alloy 600 부분은 일차수와의 직접적인 접촉이 완전히 차단된다.

SWR 적용 전후에 대하여 정상 운전 시작 이전 J-Groove 용접을 수행한 직후의 잔류응력을 분석한 결과는 Fig. 11과 같다. J-Groove Bottom 쪽에서 높은 인장응력이 발생하며, J-Groove Bottom에서 멀어질수록 인장응력이 감소하는데, 이는 기존 연구결과의 경

향과 일치한다²⁾. 그리고 Path 1과 Path 2에서의 인장잔류응력의 값이 차이가 발생하는 것은 노즐 용접부의 위치에 따른 용접단면적의 차이때문인 것으로 판단되며 기존 연구결과³⁾와 유사한 경향을 보이고 있다. SWR 적용시 용접부 잔류응력을 분석한 결과, 용접 직후의 잔류응력은 SWR을 적용하기 전보다 적용한 이후에 인장잔류응력의 크기가 감소한다는 것을 확인하였다. 이는 SWR을 수행하면서 노즐 용접부에 추가적인 입열과정이 발생하여 잔류응력이 재분포되면서 나타난 것으로 판단된다.

SWR 적용 전후에 대하여 원자로 정상 운전 조건에 대해 해석을 수행한 결과는 Fig. 12와 같은데, 인장잔류응력의 크기가 정상 운전 시작 이전의 경우(Fig. 11)보다 작게 나타났다. 이것은 원자로 정상 운전시 고온, 고압 조건을 겪으면서 잔류응력 분포가 완만한 형태로 수렴 및 완화되는 현상을 보이는 것으로 판단된다.

SWR 적용 후의 잔류응력은 압축잔류응력이 분포되는 결과를 얻었다. 이로부터 SWR이 J-Groove 용접

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 11 Residual stress after J-groove welding (9mm, 3 layer)

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 12 Residual stress in normal operation (9mm, 3 layer)

직후의 잔류응력 및 정상 운전 조건에서의 잔류응력을 모두 완화시키는 효과를 나타낸다고 할 수 있다.

용접 층수에 따른 잔류응력의 크기를 분석하기 위해 Fig. 13과 같이 덧씌움 용접구조물의 두께가 9mm, 용접층수가 1층인 경우와 두께가 9mm, 용접층수가 3층인 경우를 비교하였다. 0도 방향과 180도 방향에서의 용접부 모두 3층인 경우가 더 작은 용접 직후의 인장잔류응력 또는 압축잔류응력을 나타내는 것을 확인하였다. 이로부터 동일한 두께로 용접을 수행할 경우, 덧씌움 용접구조물을 Single Layer가 아닌 Multi Layer로 쌓을 때 J-Groove 용접부에서 용접 직후의 인장잔류응력 완화 효과가 더 크다는 것을 확인하였다.

Fig. 14는 원자로 정상 운전 조건에서 용접 층수에 따른 잔류응력의 비교 그래프를 나타낸 것이다. 0도 방향과 180도 방향에서의 용접부 모두 3층인 경우가 더 큰 압축잔류응력을 나타내는 것을 확인할 수 있는데, 이로부터 동일한 두께로 용접을 수행할 경우, 덧씌움 용

접구조물을 Single Layer가 아닌 Multi Layer로 쌓을 때, 정상운전 시 J-Groove 용접부에서 인장잔류응력 완화 효과가 더 크다는 것을 확인하였다.

덧씌움 용접구조물의 두께가 3mm, 용접 층수가 1층인 경우와 두께가 6mm, 용접 층수가 1층인 경우, 그리고 두께가 9mm, 용접 층수가 1층인 경우의 비교를 통해 용접구조물의 두께에 따른 잔류응력의 크기를 분석하였다. Fig. 15에서 그래프가 중간에 교차하고 있는 것을 확인할 수 있고, 0도와 180도 방향의 용접부 각각의 경우가 경향도 다른 것을 알 수 있다. 즉, 용접 직후의 잔류응력은 용접구조물 두께에 따른 뚜렷한 변화를 보이고 있지 않다. 이것은 용접부 위치에 따른 기하학적 형상의 차이로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 16은 원자로 정상운전 조건에서 용접구조물의 두께에 따른 잔류응력의 비교 그래프를 나타낸 것이다. 0도 방향의 용접부에서는 용접구조물의 두께가 두꺼울수록 더 작은 인장잔류응력 또는 더 큰 압축잔류응력을

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 13 Residual stress after J-groove welding (1 layer, 3 layer)

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 14 Residual stress in normal operation (1 layer, 3 layer)

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 15 Residual stress after J-groove welding (3mm, 6mm, 9mm)

나타내고 있음을 확인할 수 있는데, 이로부터 동일한 용접 층수인 경우 덧씌움 용접구조물을 더 두껍게 쌓을수록, 정상운전 시 J-Groove 용접부에서 인장잔류응력 완화 효과가 더 크다는 것을 확인하였다. 그리고 180도 방향의 용접부에서는 그래프가 중간에 교차하고 있고, 잔류응력 값의 크기가 큰 차이를 보이고 있지 않으며, 모든 두께에서 압축잔류응력을 나타내고 있음을 확인하였다. 즉, 180도 방향의 용접부에서는 용접구조물의 두께에 따른 뚜렷한 경향은 보이고 있지 않으나, 모든 경우에서 압축잔류응력을 나타내므로, 용접부의 균열발생 가능성은 매우 낮다고 판단하였다. 180도 방향의 용접부에서는 두께에 따른 뚜렷한 경향은 없으나 모든 경우에서 압축잔류응력을 나타내고, 0도 방향의 용접부에서는 덧씌움 용접구조물의 두께가 두꺼울수록 정상운전 시 인장잔류응력의 완화 효과가 더 크므로, 구조건전성 측면에서 볼 때 용접구조물의 두께를 두껍게 쌓을수록

(a) Path 1 (Nozzle axis direction at 0 degree)

(b) Path 2 (Nozzle axis direction at 180 degree)

Fig. 16 Residual stress in normal operation (3mm, 6mm, 9mm)

더 안전하다고 판단하였다.

4. 결 론

원전 CEDM 노즐 J-Groove 용접부에 Seal Weld Repair 기술을 적용할 시 용접잔류응력 형성에 미치는 영향을 파악하기 위해 ABAQUS를 사용하여 잔류응력 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Seal Weld Repair는 J-Groove 용접부의 인장 잔류응력을 완화시켜서 일차수 응력부식균열의 발생 가능성을 낮출 수 있다.

2) Seal Weld Repair 적용시, 덧씌움 용접구조물을 Single Layer가 아닌 Multi Layer로 쌓을 때 인장 잔류응력의 완화 효과가 더 크다.

3) Seal Weld Repair 적용시, 원자로 운전 중 균열 발생 위험성을 고려할 때 덧씌움 용접구조물을 두껍게 쌓을수록 안전하다.

이와 같은 해석 결과는 향후 국내 원전의 CEDM 노즐 용접부에 밀봉용접보수를 적용할 시 건전성 평가 측면에서 의미있는 자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

ORCID: Jong-Ho Kang: <http://orcid.org/0000-0002-6220-7272>

ORCID: Young Tae Cho: <http://orcid.org/0000-0001-7545-4646>

References

- Nam, H. S., Bae, H. Y., Oh, C. Y., Kim, J. S., & Kim, Y. J., Effect of normal operating condition analysis method for weld residual stress of CRDM nozzle in reactor pressure vessel, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 37 (9) (2013), 1159-1168
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.9.1159>
- Lee, K. S., Lee, S. H., & Bae, H. Y., Evaluation for weld residual stress and operating stress around weld region of the CRDM nozzle in reactor vessel upper head, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36 (10) (2012), 1235-1239
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.10.1235>
- Kim, J. H., Yoo, S. H., & Kim, Y. J., Effects of repair weld of reactor pressure vessel upper head control rod drive mechanism penetration nozzle on J-Groove weldment using finite element analysis, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 38 (6) (2014), 637-647
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.6.637>
- Bae, H. Y., Kim, J. H., Kim, Y. J., Oh, C. Y., Kim, J. S., Lee, S. H., & Lee, K. S., Sensitivity analysis of finite element parameters for estimating residual stress of J-groove weld in RPV CRDM penetration nozzle, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36 (10) (2012), 1115-1130
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.10.1115>
- Bae, H. Y., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Kim, K. H., Chae, S. W., & Kim, J. H., Sensitivity analysis of nozzle geometry variables for estimating residual stress in rpv CRDM penetration nozzle, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 37 (3) (2013), 387-395
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.3.387>
- Kim, J. H., Kim, Y. J., Lee, S. H., Hur, N. Y., Bae, H. Y., Oh, C. Y., Kim, J. S., Park, H. B., Lee, S. G., Kim, J. S., & Huh, N. S., Effects of geometry of reactor pressure vessel upper head control rod drive mechanism penetration nozzles on J-Groove weld residual stress, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 35 (10) (2011), 1337-1345
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.10.1337>
- Kim, S. C., & Kim, M. W., Effect of Weld Residual Stress on Fatigue Analysis of Nozzle, *Journal of Welding and Joining*, 32 (1) (2014), 71-78
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.1.71>
- Lee, S. G., Oh, C. K., Park, H. B., & Jin, T. E., Analysis of Overlay Weld Effect on Preventing PWSCC in Dissimilar Metal Weld, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 34 (1) (2010), 97-101
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.1.97>
- Song, T. K., Bae, H. Y., Chun, Y. B., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S., & Park, C. Y., Effect of preemptive weld overlay on residual stress mitigation for dissimilar metal weld of nuclear power plant pressurizer, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 32 (10) (2008), 873-881
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.10.873>
- Kim, W. J., Lee, K. S., Kim, T. R., & Song, T. K., Parametric study for welding residual stresses in nozzle of nuclear power plants using finite element method, *Korean Association of Mechanical Science and Technology*, (2008), 104-109
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40025175
- Kim, J. S., Kim, J. H., Bae, H. Y., Oh, C. Y., Kim, Y. J., Lee, K. S., & Song, T. K., Welding residual stress distributions for dissimilar metal nozzle butt welds in pressurized water reactors, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36 (2) (2012), 137-148
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.2.137>
- Park, E. J., & Kim, E. J., An Evaluation of Residual Stress Redistribution in the Welding Residual Stress Field Caused by Fatigue Crack Propagation by Finite Element Method, *Journal of Welding and Joining*, 26 (6) (2008), 92-96
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2008.26.6.092>
- Lee, S. G., Jin, T. E., Kang, S. S., & Kwon, D. I., Residual Stress Analysis for Repair Welding in Dissimilar Metal Weld, *Journal of Welding and Joining*, 27 (4) (2009), 32-37
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.4.032>
- SIMULIA, 2012, ABAQUS, Version 6.12
- Jang, Y. C., A study for crack stability assessment of direct vessel injection nozzle of reactor vessel considering crack path, Chung-Ang University, (2015)
<http://www.riss.kr/link?id=T13849390>