

기계적 응력이완 방법에 의한 원전기기 용접부의 잔류응력 재분포

이 세 환* · 김 종 성* · 진 태 은*

*한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

Residual Stress Redistribution on Welds of Nuclear Component by Mechanical Stress Relieving Methods

Se-Hwan Lee*, Jong-Sung Kim* and Tae-Eun Jin*

*Material Technology Research Group, Korea Power Engineering Company, Yongin 449-713, Korea

Abstract

Residual stresses, which can be produced during the welding process, play an important role in an industrial field. Welding residual stresses are exerting negative effect on the fatigue behavior and integrity of structure. In this study, as a result of the thermal elasto-plastic finite element analysis for the welds of a nuclear component, the residual stress distributions are estimated for as-welded condition. Also, finite element techniques are developed to simulate the relaxation of the residual stresses according to the various mechanical stress relieving(MSR) loads such as hydrostatic pressure loading, tensile pipe-end loading, and mechanical stress improvement process(MSIP) loading. Finally, the results of residual stress redistributions for various loading conditions are compared and reviewed qualitatively and quantitatively to find an optimum loading condition.

* Corresponding author : sehlee@kopec.co.kr

(Received December 11, 2003)

Key Words : Residual stress, Mechanical stress relieving(MSR), Nuclear component, Finite element method, Mechanical stress improvement process(MSIP)

1. 서 론

용접은 작업의 용이성, 기밀의 우수성 등의 장점으로 여러 구조물의 접합방법으로 사용되고 있다. 그러나, 용접공정의 특성상 국부적인 가열과 냉각으로 인하여 용접부와 그 주위에 변형과 수축을 동반하며, 동시에 용접 잔류응력이 존재하게 된다. 특히 용접 인장 잔류응력은 피로와 응력부식균열(SCC) 측면에서 균열의 발생 및 전파에 도움을 주는 인자로 작용함으로써 구조물의 건전성 측면에 나쁜 영향을 주게 된다. 특히, 용접부 주위 표면으로 분포하는 인장 잔류응력은 용접 구조물의 피로강도에 직접적인 영향을 주기 때문에 일반적으로 대부분의 주요 구조물은 이러한 잔류응력을 완화시켜 사용함을 의무화하고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 용접 잔류응력의 이완 방법은

크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 후열처리(PWHT)와 같은 열적인 변화를 이용하는 방법¹⁾과 둘째는 정적인 하중이나 기계적 피로하중과 같은 기계적인 하중을 이용하는 방법²⁻³⁾을 들 수 있다. 최근에는 이외에도 슛피닝 방법⁴⁾, 레이저를 이용한 shock peening 방법⁵⁾, 그리고 진동을 이용한 잔류응력 제거 방법⁶⁾ 등 다양한 방법들이 연구되고 실제 사용되기도 한다.

열처리 방법에 의한 잔류응력 제거 방법은 큰 구조물 용접부에 적용하는 경우 대규모의 가열로나 큰 부대장비를 필요로 하며 열처리 후의 재료의 물성변화로 인한 취약성을 가지고 있다. 또한 슛피닝 방법은 shot의 크기와 재료의 종류 등에 따라 응력변화에 많은 변화를 나타내고 있어 현재 많은 연구의 필요성을 가지고 있다. 그 외의 방법인 shock peening 방법과 진동에 의한 방법은 현재 초기 연구 상태에 있으며 실제 사용에 검증이 필요하다. 그러므로 현재는 구조물의 크기나 용접부의 형태에 따라

다르기는 하지만, 일반적으로 기계적인 하중에 의한 잔류응력 제거 방법이 보다 효과적으로 사용된다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 원전 가압기의 분무노즐부위 용접부를 모델링하고, 열/탄소성(thermal elasto-plastic)해석을 통하여 용접 잔류응력분포를 구하였다. 그리고 이러한 잔류응력분포를 가지는 모델에 기본적으로 세 가지의 다른 기계적 하중을 적용하여 잔류응력의 재분포를 구하였다. 적용된 기계적 하중은 첫째, 수압시험(hydrostatic test) 압력을 변화시켜 가하였고, 둘째는 노즐연결 배관의 끝단부위에 외부 인장하중을 변화시켜 가한 후의 잔류응력 변화량을 구하였다. 마지막으로 현재 일부 원전 용접부에 응력부식균열의 방지방법으로 적용되는 방법인 기계적 응력개선방법(mechanical stress improvement process: MSIP)⁷⁾에 의한 잔류응력 이완량을 유한요소 해석을 이용하여 구하고 이러한 결과를 초기 잔류응력과 비교하였다. 잔류응력이 재분포된 유한요소 해석 결과 각 적용된 방법의 최적 조건을 찾을 수 있었으며 MSIP 방법이 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 잔류응력 해석

용접에 의해 발생하는 잔류응력 해석에 사용된 모델은 한국표준형원전(KSNP)에 사용되는 가압기 분무노즐 부위로 선택하였다. 해석 대상으로 선정된 노즐 부위는 이중재 용접부라는 미세조직/구조적인 취약성을 가지며 피로와 SCC에 취약한 부위로 알려져 있다.

2.1 해석모델

잔류응력 이완 모델에 앞서 먼저 용접 잔류응력 해석

을 수행하였다. 잔류응력 해석 및 응력이완 해석에 사용된 모델은 동일하며 4절점, 축대칭 모델을 사용하였으며, 절점수는 1530개, 요소수는 1687개로 하였다. Fig. 1은 해석 구조물의 형상 및 크기를 도식적으로 나타내고 있다. 전체 해석모델의 유한요소 형상과 경계조건은 Fig. 2에 나타내고 있다. Table 1에는 본 해석에

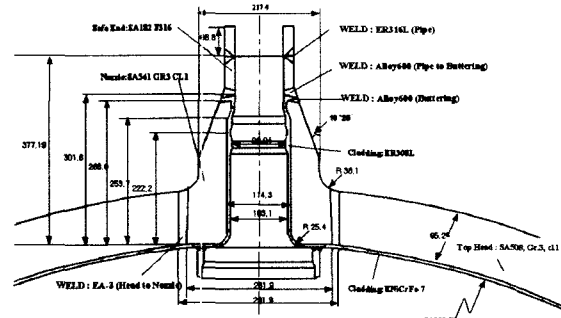


Fig. 1 Schematics of size, materials and shape of analysis model (unit:mm)

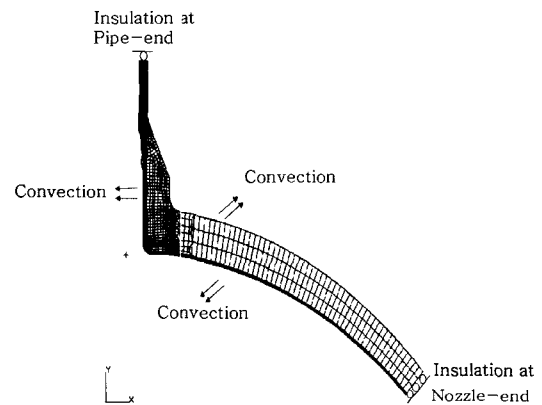


Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions

Table 1 Chemical compositions of the main substrates

(unit : weight %)

Comp. / Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb	Fe
SA182 F316	0.08 Max.	2.00 Max.	0.045 Max.	0.03 Max.	1.00 Max.	0.32	10.0- 14.0	16.0- 18.0	2.0- 3.0	0.02	0.06	0.04	66.4
SB-168 (Inconel 600)	0.15 Max.	1.0 Max.	-	0.015 Max.	0.5 Max.	0.5 Max.	72.0 Min.	14.0- 17.0	-	-	-	-	6.0- 10.0
SA508 Gr.3 Cl.1	0.25 Max.	1.20- 1.50	0.025 Max.	0.025 Max.	0.15- 0.40	-	0.4-1.0	0.25 Max.	0.45- 0.60	-	0.05 Max.	-	Base
SA541 Gr.3 Cl.1	0.25 Max.	1.20- 1.50	0.025 Max.	0.025 Max.	0.15- 0.35	-	0.4-1.0	0.25 Max.	0.45- 0.60	-	0.05 Max.	-	Base
ER308L	0.08 Max.	3.00 Ma.	0.04 Max.	0.03 Max.	1.0 Max.	0.75	8.0- 12.0	18.0- 24.0	2.0- 3.0	-	-	-	Base
ENiCrFe-7	0.05 Max.	5.00 Max.	0.03 Max.	0.015 Max.	0.75 Max.	0.5 Max.	Bal.	28.0- 31.5	0.50	0.50	-	-	7.0- 12.0

사용된 주요 재료의 화학적 조성을 나타내고 있다. 해석의 순서는 각각 온도해석과 탄소성 응력해석을 순차적으로 수행하였다. 온도해석과 응력해석에 사용된 재료물성치는 온도에 따른 물성의 변화를 고려한 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 3 (a)와 (b)에는 안전단-배관 용접부 재료인 스테인리스(SA182 F316)강의 온도 해석에 사용된 열적/물리적 재료물성치와 응력해석에 사용된 기계적 물성치를 각각 나타내고 있다.

본 해석 모델의 용접부는 총 4개의 용접부를 포함하며 각각 다음과 같다. 가압기 헤드-노즐 용접부, 노즐 버터링(buttering)부분, 버터링-안전단(safe-end) 용접부, 및 안전단-배관 용접부를 각각 다중패스(multi-pass) 용접으로 고려하였다.

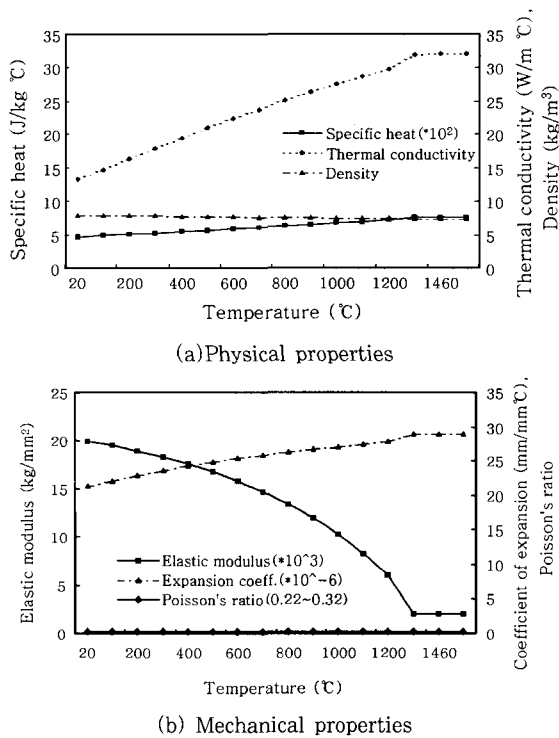


Fig. 3 Temperature dependent thermal and mechanical properties of F316 stainless steel

2.2 온도해석

온도 분포해석에서는 해석시간 및 효과적인 계산을 위하여 Lumped pass 모델⁸⁾을 사용하였다. 온도구배가 심한 용접패스 용입 부분은 조밀한 요소를 사용하였고, 각 패스 용입은 사용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS의 요소 생성 및 제거 기능(model change)⁹⁾을 사용하여 모델링 하였다. 온도 해석시 경계조건은 아래 (1)식과 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 경계면인 끝단은 단열조건을 적용하였고 나머지 부분인 노즐부 내면과 외면에서는 대류에 의한 경계조건을 각각 적용하였다.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \text{ at inner and outer surface}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ at pipe-end and nozzle-end} \quad (1)$$

여기서, k 는 재료의 열전도도, \vec{n} 은 표면에 수직인 방향 벡터, h 는 열전달계수(=10 W/m²°C)이고 T_a 는 주위온도이다.

용착 금속의 용입시 온도 경계조건은 초기 온도는 상온인 25°C로 가정하였고 용입 온도는 용착 금속의 용융온도인 1470°C로 가정하였다. 또한 Table 2에 나타낸 예열 및 후열처리 조건 등을 고려한 온도 경계 조건을 사용하였다. 그 결과 중에서 안전단-배관 용접부의 온도분포 해석 결과는 Fig. 4와 같이 나타난다. Fig. 4(a)는 용접 패스가 용입되고 약 4초가 경과한 후의 온도분포이며, Fig. 4(b)는 약 200초가 지난 냉각과정을 나타내고 있다. Fig. 5에는 헤드-노즐 용접부에서의 다중 용접시 온도 분포 이력을 전체 용접시간에 대해 나타내고 있다. 최종 패스가 용접되는 열영향부상의 두 절점에서의 온도분포는 다중 용접의 특성인 톱니모양의 이력 특성을 잘 나타내고 있다.

Table 2 Welding and temperature conditions for each welds

Welded Part	Parameter						
	Process	Voltage (V)	Current (A)	Velocity (cm/min)	Preheat Temp. (°C)	Interpass Temp. (°C)	PWHT (°C/hr)
Buttering	GMAW	27~38	300~600	24~80	70	170 max.	615±20/3min.~40max.
Head-Nozzle	SMAW	20~28	80~190	24~80	121	250 max.	615±20/3min.~40max.
Buttering-Safe End	SMAW	20~28	80~190	-	16	175 max.	210~300/2
Safe End-Spray line	GTAW	10~14	90~200	8~15	70	170 max.	-

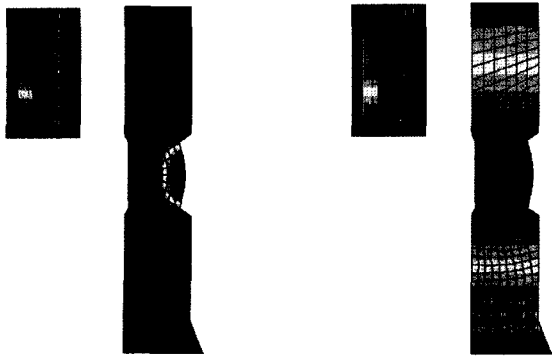


Fig. 4 Temperature distributions of the pipe weld (at the 5th weld pass)

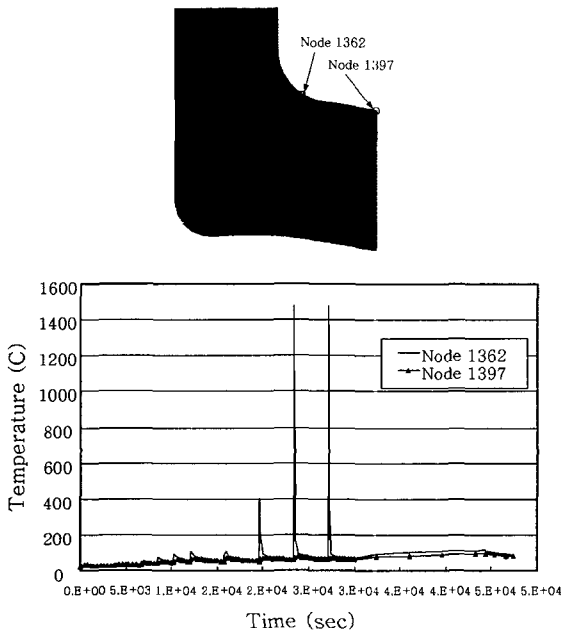


Fig. 5 Temperature histories at nodes on head-nozzle weld according to time

2.3 응력해석

위의 온도분포 해석 결과를 이용하여 잔류응력 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석시의 경계조건은 Fig. 2에 나타내바와 같이 헤드부의 끝단을 수직인 방향으로 좌표변환을 통하여 구속하고 배관부 끝단을 y방향으로 구속하였다.

잔류응력 해석 결과 안전단-배관 용접부 부근의 응력 분포를 유효응력(Von-Mises effective stress)으로 나타내면 Fig. 6(b)와 같이 나타난다. 또한, Fig. 6(a)의 단면 A-A'에서의 원환응력, 축방향 및 유효응력을 Fig. 7에 나타내고 있다. 내벽에서의 응력분포는 전반적으로 모두 인장응력을 나타내며 전반적인 인장응력의 크기는 원환응력이 크게 나타나지만, 내벽 표면에서의 크기는 축방향 응력이 원환응력보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 반경반향 응력은 두께 전체에서 상대적으로 적

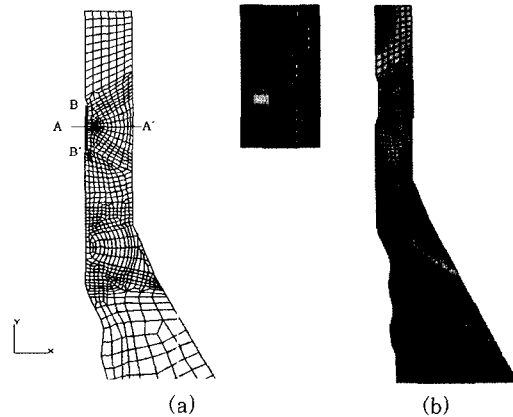


Fig. 6 Interesting section and Von-Mises effective residual stress distribution of safe-end-pipe weld

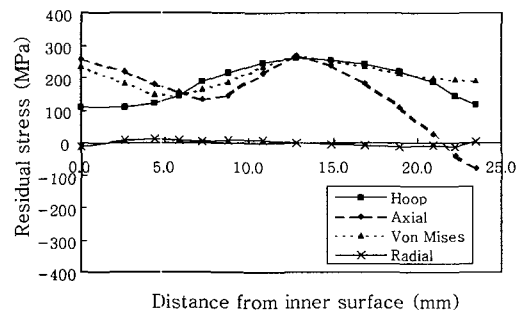


Fig. 7 Residual stress distributions of pipe weld (at section A-A')

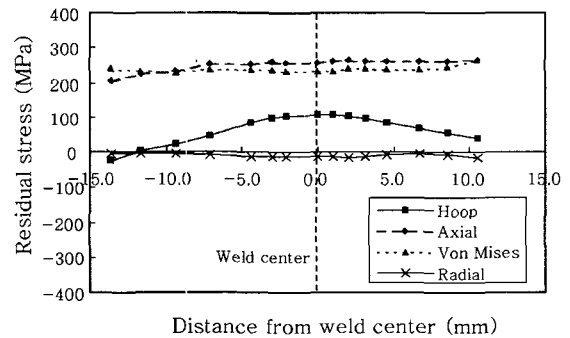


Fig. 8 Residual stress distributions of pipe weld (at section B-B')

게 나타났다. Fig. 8은 Fig. 6(a)의 단면 B-B'에서의 각 응력 분포를 나타내고 있다. 축방향 응력이 크기 나타났으나 그 분포가 용접중심선을 중심으로 거의 일정한 분포를 가졌다. 그러나 원환 응력의 크기는 용접 중심선에서 가장 큰 값을 가졌다. 배관부 내벽은 부식 환경에 노출되어있고 Fig. 7-8에 보이는 바와 같이 용접부 내벽면에서 인장 잔류응력이 작용하므로 응력부식균열의 발생 가능성이 크며 피로측면에서도 취약한 부위로 알려져 있다. 그러므로 본 연구 결과 고찰에서는 용접부 내면을 관

심부위로 선정하였고 용접중심선을 기준으로 응력이완 결과를 고찰하고자 한다.

3. 잔류응력 이완 기구 및 적용 방법

3.1 응력 이완기구

본 연구에서는 크게 두 가지의 경우의 기계적 하중의 작용으로 용접부에 존재하는 잔류응력의 이완의 예를 들 수 있다. 첫 번째 방법은 구조물의 전체에 작용하는 인장 및 압축 하중을 가하여 잔류응력을 제거하는 방법으로, 본 해석에 사용한 방법 중 배관부 끝단에 인장하중을 작용하는 경우와 노즐 및 배관 부 내면 전체에 수압시험 압력의 압축 하중을 작용하는 경우를 들 수 있겠다. 두 번째의 경우는 MSIP 방법으로 용접부 주위로 압축 하중을 가하여 일정 크기의 소성변형을 유도하고 그 영향으로 인한 잔류응력의 이완 및 재분포를 유도하는 방법을 들 수 있다.

그 한 예로써, 먼저 배관부 끝단에 인장하중이 가해지는 경우의 잔류응력 이완 기구를 Fig. 9에 나타낸 응력-변형률 선도로 그 설명이 가능하다. 초기 잔류응력 상태를 σ_{r1} , ϵ_r 로 가정하고 그 상태에서 하중을 가하여 응력 상태가 σ_p , ϵ_p 가 되게 한 후 하중을 제거하게 되면 응력 상태는 그림에 표시한 화살표 방향의 선을 따라 σ_{r2} , ϵ_r 방향으로 복귀하게 된다. 만약 용접부에 발생하는 소성변형의 량이 전체 부재가 갖는 탄성 거동에 비해 무시할 정도라고 가정하면, 결국 초기의 잔류응력 상태는 σ_{r1} 에서 σ_{r2} 로 줄어들게 된다.²⁾ 또한, MSIP에 대한 기본적인 응력 이완 기구는 Fig. 10에 나타내고 있다. 그 응력 이완의 절차는 그림 (a)와 같은 용접부의 주위로 하중을 가할 수 있는 장비를 이용하여 그림(b)와 같이 적정량의 소성 변형을 유도하는 하중을 가한 후 제거

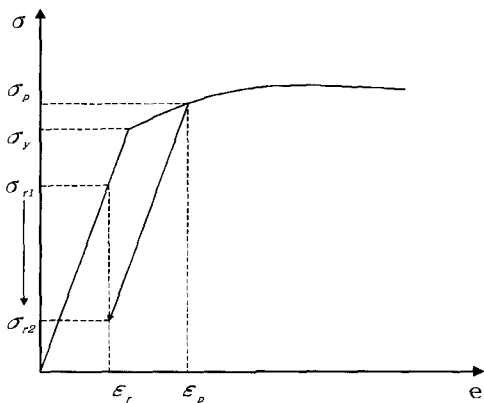


Fig. 9 Stress-strain behavior for MSR loading in tensile region

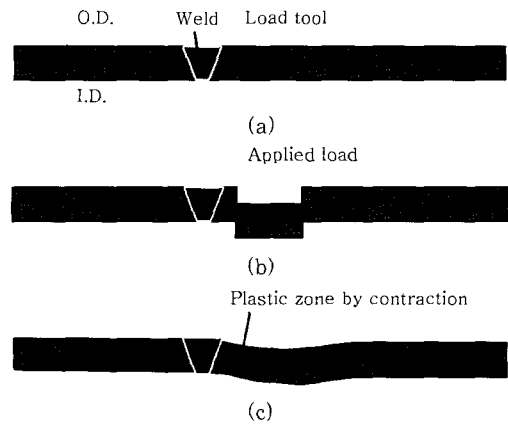


Fig. 10 Mechanism of residual stress relaxation by MSIP

하면 그림(c)와 같이 최후에 영구변형을 동반한 소성영역이 존재함과 동시에 잔류응력의 재분포를 유도하게 된다. 이러한 소성변형은 궁극적으로 용접부에 존재하는 인장 잔류응력의 최대값을 낮추고 그 분포를 양분하는 효과를 갖게 된다. 또한 가해주는 하중의 크기, 즉 발생하는 소성변형의 량에 따라 응력분포를 인장에서 압축응력으로 변화시키기도 한다.

3.2 응력 이완 해석에 적용된 방법

본 해석에서 잔류응력 이완에 사용한 하중의 부하 방법은 Fig. 11에 개략적으로 보여주고 있으며, 크게 세 가지 경우로 나눌 수 있다. 첫째는 수압 시험 시 가해지는 초기 설정 압력(21.5 MPa)을 기준으로 각각 80, 100, 150, 200%로 변화시켜 하중을 가하였다. 둘째는 그림에 나타낸 것과 같이 배관부 끝단에 인장 하중을 가하였으며 적용하중의 변화량은 스테인리스 재질인 배관 용접부 모재(SA182-F316)의 항복응력을 기준으로 각각

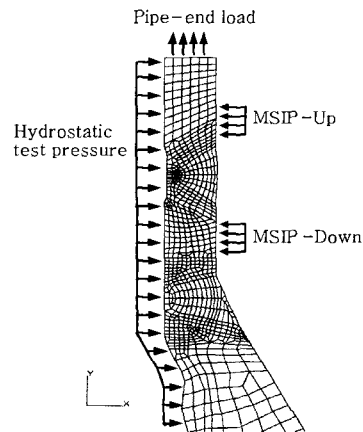


Fig. 11 Applied MSR loads

60, 80, 90%의 하중을 가하였다. 마지막으로 MSIP의 하중 적용방법은 용접부를 중심으로 배관부쪽(MSIP-Up) 및 노즐 헤드부쪽(MSIP-Down)으로 나누어 하중을 가하였으며 하중 변화량은 마찬가지로 모재의 항복응력을 기준으로 하여 각각 50, 70, 90%의 하중을 적용하였다. 또한, 과도하중으로 인한 변형문제가 발생할 수 있으므로 하중의 크기를 항복응력의 10, 30, 50%로 적게 하중을 가하는 대신에 용접부를 중심으로 배관부쪽과 노즐 헤드부쪽에 동시에 하중을 가하고 추가적으로 초기 설정 정수압 시험 압력을 일정하게 동시에 가하는 경우의 잔류응력 재분포 결과도 해석하였으며 각 결과 값을 비교하였다.

4. 응력 이완 결과 및 고찰

전장에서 전술한 각 응력 이완 적용방법들에 대해 유한요소 모델을 구성하고 각 하중형태에 대해 탄소성 해석을 통하여 최종 잔류응력을 계산하였다. 해석시 초기 조건은 용접 후 잔류응력이 존재하는 응력장을 이용하였고 경계조건은 잔류응력 해석에 적용한 조건과 동일한 구속조건을 사용하였다. 각 하중 작용 방법에 따른 잔류응력 재분포 결과는 다음과 같다.

4.1 수압시험 압력 작용에 따른 응력 이완

수압시험시 내벽에 가해지는 압력은 실제 원자로 출구 노즐 부위에 가해지는 가압력(21.5MPa)을 기준으로 80-200%까지 변화시킨 결과 잔류응력의 재분포 특성을 살펴보면 Fig. 12와 같다. Fig. 12에는 원환응력의 변화를 나타내며 용접 후 잔류응력 값과 비교해 배관 외경 쪽으로 갈수록 약간의 응력변화는 있으나 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기준 압력이 되는 수압시험 압력자체가 항복응력의 15%미만으로 적은 값이므로 전체 구조물의 응력 변화에는 크게 영향을 미치지 않

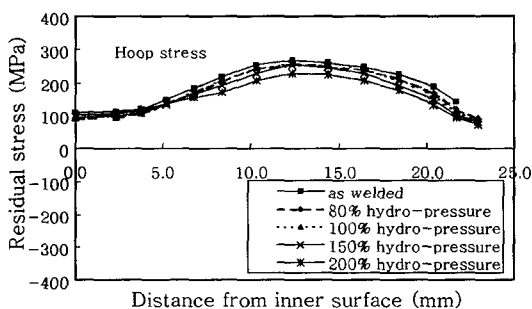


Fig. 12 Residual stress distributions along the weld center line after various hydrostatic pressure loads

음을 보여주고 있다.

4.2 배관 끝단 인장하중 작용에 따른 응력 이완

배관 끝단에 모재의 항복응력에 비례하는 인장하중을 가해준 결과 Fig. 13과 같은 잔류응력의 이완효과를 얻었다. 작용 하중 크기가 증가함에 따라 전체적인 이완량이 증가하며 특히 내벽의 인장응력 변화가 외벽에서보다 더 크게 변화함을 볼 수 있다. 또한 작용하중이 항복응력의 80% 이상이 되면 내벽에서의 인장 잔류응력은 압축으로 변화함을 알 수 있다. 이러한 효과는 초기의 잔류응력 상태에 하중이 가해지면서 응력의 합이 항복을 초과하여 소성을 일으킨 결과이며 피로 측면에서 우호적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 이러한 방법은 용접공정이 완료되어 배관의 배치가 모두 이루어진 상태의 실제 현장에서는 하중을 가하는 방법상 적용이 어려운 문제점이 있다.

4.3 MSIP 하중 작용에 따른 응력 이완

용접부 주위 일정거리에서 하중을 가하여 모재에 영구 변형을 유도하여 용접부의 잔류응력 재분포를 유도하는 방법인 MSIP 하중을 몇 가지 형태로 변화시켜 작용한 결과 각각 다른 응력 이완 형태를 얻을 수 있었다. 먼저 용접부를 중심으로 노즐 헤드부에 하중을 작용한 MSIP-Down의 경우 잔류응력 이완 결과는 Fig. 14에 나타내고 있다. 그림에 나타난 것과 같이 항복응력에 비례한 작용 하중의 크기가 증가함에 따라 원환응력과 축응력 모두 응력의 크기는 감소하며, 축방향 응력은 항복응력의 70%를 가해주어도 내벽에서 압축잔류응력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 원환응력은 작용 하중의 크기 증가에 거의 선형적으로 비례하여 응력이 감소하였고 항복응력의 70% 이상을 작용하면 내벽에 압축잔류응력을 유도할 수 있었다. 이러한 압축잔류응력의 발생은 작용하중의 크기가 작용면에 영구 소성변형을 유도할 수 있음을

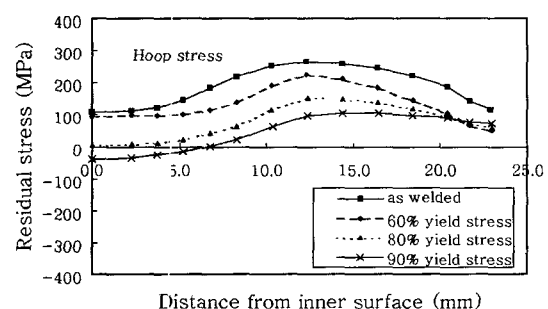
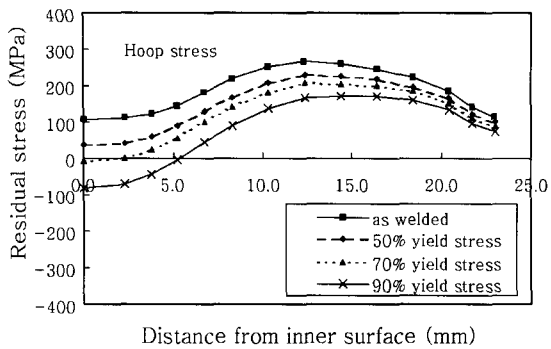
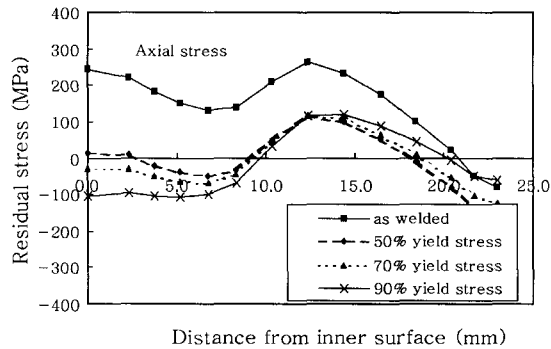


Fig. 13 Residual stress distributions along the weld center line after various pipe-end loads

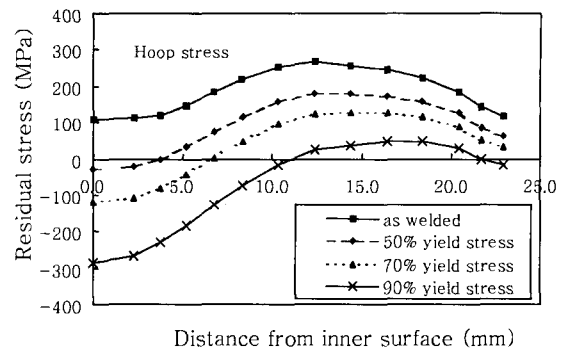


(a) Hoop Stress

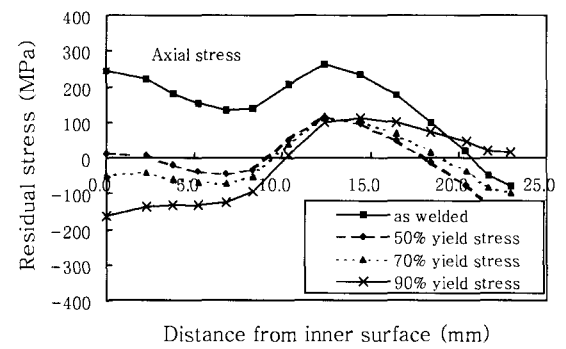


(b) Axial stress

Fig. 14 Residual stress distributions along the weld center line after MSIP-Down loads



(a) Hoop Stress



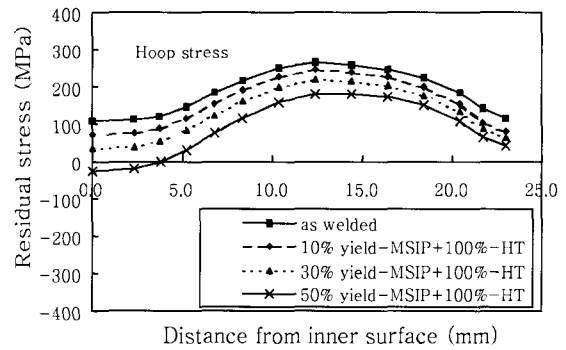
(b) Axial stress

Fig. 15 Residual stress distributions along the weld center line after MSIP-Up loads

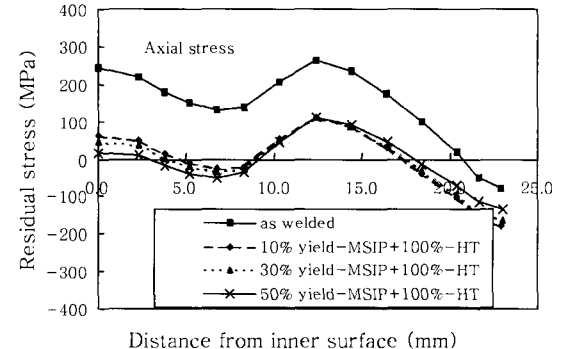
의미한다. 따라서 이러한 작용 하중의 최소 크기를 압축 응력을 유도하는 임계하중이라 생각할 수 있으며 그 하중의 정량적인 값을 찾는 것은 작용하중의 경제적인 측면에서 중요하다.

Fig. 15에는 용접부를 중심으로 배관쪽에 하중을 작용한 경우(MSIP-Up)의 응력 이완결과를 나타내고 있다. 원환응력은 항복응력의 50% 크기의 하중 작용으로도 압축 잔류응력을 얻을 수 있었으며 MSIP-Down의 결과보다 높은 응력 이완 결과를 보였다. 그러나 축방향 응력의 경우 잔류응력 재분포 결과는 MSIP-Down결과와 큰 차이가 없음을 나타내고 있다. 결국 하중을 가하는 위치에 따라 잔류응력 재분포 및 압축응력을 유도하는데 큰 영향을 줄 수 있다.

항복응력의 10, 30, 50%의 크기로 동시에 MSIP-Up 하중과 100%의 수압 시험 압력을 가하는 경우의 응력 분포는 Fig. 16과 같다. 원환응력과 축방향 응력 모두 하중이 증가함에 따라 인장 잔류응력의 크기는 감소하였다. 이러한 복합하중 작용 결과를 Fig. 14의 동일한 항복하중의 50%의 단순 MSIP-Down 하중만을 가한 경우와 비교하면, 축방향 응력의 경우는 복합하중 조건과 거의 유사한 응력이완 분포를 보인다. 그러나 원환응력은 복합하중 조건의 경우 그 감소량이 MSIP-



(a) Hoop Stress



(b) Axial stress

Fig. 16 Residual stress distributions along the weld center line after MSIP-Up with hydrostatic pressure loads

Down 하중 조건만을 적용한 경우보다 훨씬 크게 나타났다. 내면에서의 응력변화를 보면, MSIP-Down의 단독하중의 경우, 상당량의 인장 잔류응력이 존재하는 반면 복합하중의 경우는 압축 잔류응력을 유도할 수 있었다. 이러한 결과로부터 원환응력의 경우는 복합하중 조건이 잔류응력 이완에 보다 더 적합한 조건임을 알 수 있다. 또한 원환응력의 경우는 하중의 증가에 따라 응력 감소량이 선형적으로 비례하여 감소하였으나 축방향 응력의 경우는 항복응력의 10% 하중에 크게 감소하였으나 그 이상의 하중 증가에는 감소 크기의 변화가 적었다. 이러한 결과는 동시에 하중이 작용하는 경우 항복응력의 10%의 하중에서 이미 소성변형에 의한 영구 변형을 유도할 수 있음을 의미한다. 그러므로 각 하중의 작용방법에 따른 압축응력을 유도할 수 있는 하중의 임계값이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 임계하중은 낮게 하며 실제 구조물에 하중을 가할 때 경제적인 하중 방법을 찾는 것이 필요하리라 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자로 출구 노즐 용접부의 용접 잔류응력 해석과 기계적 하중에 의한 잔류응력 재분포 과정을 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 잔류응력 이완을 위한 기계적 하중은 정수압 압력, 배관부 끝단의 인장 하중, 그리고 용접부 주위에 하중을 가하여 용접부의 응력이완을 얻는 MSIP 방법을 각각 적용하였다. 기계적 하중 적용 결과에 따른 잔류응력 이완 및 재분포 결과는 다음과 같이 정리할 수 있었다.

1) 기계적 잔류응력 이완 방법에 의한 응력 이완량의 크기는 전반적으로 작용하중의 크기에 비례하여 증가하였다. 또한 작용하중의 크기와 상관없이 본 해석에서 적용한 각 하중적용 방법의 변화에 의해서도 영향을 받는다.

2) 수압 시험 압력의 경우는 규정된 초기 작용하중은 잔류응력의 이완에 큰 영향을 미치지 않았다.

3) 배관부 끝단에 작용하는 인장 하중 경우 잔류응력 이완은 모재 항복응력의 80% 이상의 크기를 가하면 내벽에서 인장 원환응력이 압축응력으로 변화하였으나 기존 배관 용접부에 하중을 가하는 절차상의 어려움

로 인하여 현장 적용이 어려운 점이 있다.

4) 본 해석에서 적용한 응력이완 하중 방법 중 MSIP를 사용한 방법이 가장 큰 응력이완 결과를 얻을 수 있었으며 그 중에서도 배관부쪽(MSIP-Up)에 하중을 작용한 경우가 가장 큰 효과를 얻었다.

5) MSIP-Up 하중과 수압시험 압력을 동시에 작용한 경우, 내벽에서의 축방향 응력은 하중의 조합에 따라 하중의 크기에 선형증가하지 않고 일정크기 이상에서는 크게 증가하지 않는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. C. Shiga, A. Gotoh, T. Kojima, Y. Horii, Y. Fukada, K. Ikeuti, and F. Matuda : State of the art review on the effect of PWHT on properties of steel weld metal, *Welding in the world*, **37-4** (1996), 163-176
2. Y.S. Yang and S.H. Lee: A study on the mechanical stress relieving in a butt-welded-pipe, *International journal of pressure vessels and piping*, **73-3** (1997), 175-182
3. H. Holzapfel, V. Schulze, O. Vohringer, E. Macherauch : Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures, *Material Science and Engineering A*, **248** (1998), 9-18
4. M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald : An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel, *International Journal of Fatigue*, **24** (2002), 877-886
5. J.M. Yang, Y.C. Her, Nanlin Han, Alan Clauer : Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes, *Materials Science and Engineering A*, **298** (2001), 296-299
6. S. Weiss, et al : Vibrational Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment, *Welding Journal*, (1976), 47-51
7. E.A. Ray, K. Weir, C. Rice and T. Damico : Mechanical Stress Improvement Process (MSIP) to Prevent and Mitigate Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) in Reactor Vessel Piping at VC Summer, *ASME 2003 PVP Conference*, **468** (2003)
8. P. Dong, J. Zhang and P. J. Bouchard : Effects of Repair Weld Length on Residual Stress Distribution, *Transaction of the ASME*, **124-1** (2002), 74-80
9. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.2, (2001)