

기계적 하중에 의한 원전 용접부의 잔류응력 이완 특성

Characteristics of Residual Stress Relaxation for a Nuclear Weldment by MSR Loads

이세환*, 김종성**, 진태은***

*****한국전력기술(주)

ABSTRACT Residual stresses, which can be produced during the manufacturing process, play an important role in an industrial field. Residual stresses of structures by welding process are exerting negative effect on the fatigue behavior and safety of structure. Results from the elasto-plastic finite element analysis of the welds for a nuclear component, the residual stress distribution after welding. In this study, a finite element technique is developed to simulate the relaxation of the residual stresses due to the mechanical loads of welds.

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. 이러한 용접 잔류응력은 피로측면에서 균열의 발생 및 전파에 도움을 주는 인자로 작용함으로써 구조물의 안전성 측면에 큰 영향을 주게 된다. 특히, 용접부 주위 표면으로 분포하는 인장 잔류응력은 용접 구조물의 피로강도에 직접적인 영향을 주며 일반적으로 대부분의 주요 구조물은 이러한 잔류응력을 완화시켜 사용함을 의무화하고 있다.

현재 용접 잔류응력의 이완 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 후열처리(PWHT) 방법과 같은 열적인 변화를 이용하는 방법[1]과 둘째는 정적인 하중이나 피로하중을 구조물에 가하는 기계적인 하중을 이용하는 방법[2,3]을 들 수 있다. 최근에는 이외에도 슛피닝 방법, 레이저를 이용한 shock peening 방법[4], 그리고 진동을 이용한 다양한 방법들이 연구되고 실제 사용되고 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 원전 가압기의 분무노즐부위 용접부를 모델링하고, 탄소성해석을 통하여 잔류응력분포를 구하였다. 그리고 이러한 잔류응력분포를 가지는 모델에 수압시험(hydrostatic test)시에 가해지는 압력분포를 변

화시켜 가하고 잔류응력이 이완되는 재분포 결과를 구하였다. 또한 노즐연결 배관의 끝단부위에 외부하중으로 인장하중을 변화시켜 가한 후의 잔류응력 이완량을 구하고 이러한 결과를 초기 잔류응력과 비교하였다. 유한요소 해석에 사용된 상용코드는 ABAQUS를 사용하였다.

2. 잔류응력 해석

잔류응력 해석에 사용된 모델은 한국표준형원전(KSNP)에 사용되는 가압기 분무노즐 부위로 이중재 용접부 및 구조적인 취약성을 가지며 특히 피로에 취약한 부위이다.

2.1 해석모델

잔류응력 이완 모델에 앞서 먼저 용접에 의한 잔류응력 분포 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석 및 응력이완 해석에 사용된 모델은 동일하며 2차원-축대칭 모델을 사용하였으며, 절점수는 1530개, 요소수는 1687개로 하였다. Fig. 1은 전체 해석모델의 유한요소 형상과 경계조건을 나타내고 있다. 해석의 순서는 용접열원에 의한 온도 분포 해석을 먼저 수행하고, 그 온도분포 결과를 이용하여 열응력해석을 수행하였다.

2.2 온도분포해석

용접열원에 의한 모델은 해석시간 및 효과적인 계산을 위하여 Lumped pass 모델[5]을 사용하였다. 온도구배가 심한 용접패스 용입 부분은 조밀한 요소를 사용하였고, 각 패스 용입은 요소 생

성 및 제거(element birth and remove) 기능을 사용하였다. 또한, 재료 물성치는 온도에 따른 물성의 변화를 고려하였으며 열적 경계조건은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 경계면인 끝단은 단열조건을 나머지 부분은 각각 대류에 의한 경계조건을 적용하였다.

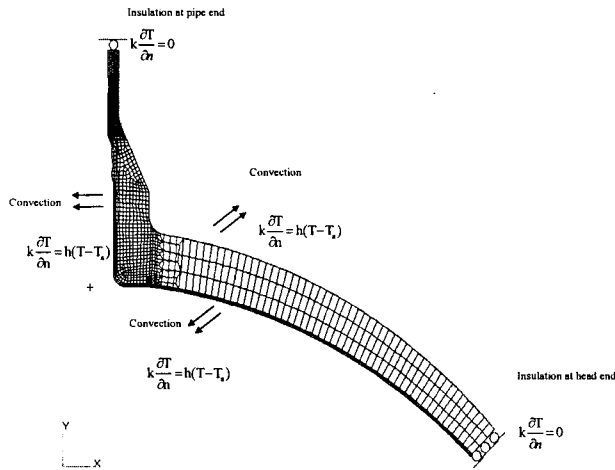
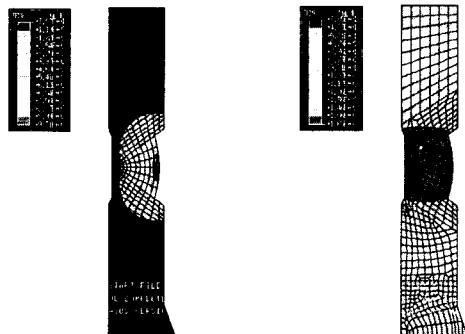


Fig. 1 Finite element mesh and boundary conditions

본 해석 모델의 용접부는 총 4개의 용접부를 포함하며 각각은 다음과 같다. 가압기 헤드와 노즐의 용접부, 노즐과 안전단(safe-end)사이의 버터링(buttering)부분 및 버터링과 안전단 사이의 용접부 그리고 안전단과 배관사이의 스테인리스강 용접부를 각각 다중패스 용접으로 고려하였다. 배관 용접부의 온도분포 해석 결과는 Fig.2와 같이 나타난다. 그림(a)는 용접패스가 용입되고 약 4초가 경과한 후의 온도분포이며, 그림(b)는 약 200초가 지난 냉각과정을 나타내고 있다.



(a) after 3 sec (b) after 200 sec
Fig. 2 Temperature distributions of the pipe welding (at the 5th weld pass)

2.3 응력해석

위의 온도분포 해석 결과를 이용하여 잔류응력

해석을 수행하였다. 잔류응력 해석시의 경계조건은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 헤드부의 끝단을 대칭인 방향으로 좌표변환을 통하여 구속하고 배관끝단을 y방향으로 구속하였다.

잔류응력 해석 결과 배관 용접부 부근의 응력분포는 평균응력을 나타내면 Fig. 3과 같이 나타난다.

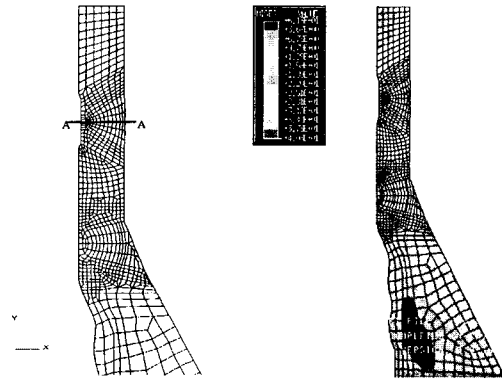


Fig. 3 Residual stress distribution of pipe weld(Mises stress)

또한, Fig. 3의 단면 AA에서의 원환응력, 축방향 및 평균응력을 Fig. 4에 나타내고 있다. 내벽에서의 응력분포는 전반적으로 모두 인장응력을 나타내며 전반적인 인장응력의 크기는 원환응력이 크게 나타나지만, 내벽에서의 크기는 축방향 응력이 원환응력보다 크게 나타남을 알 수 있다.

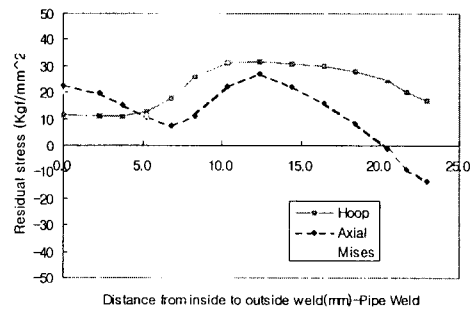


Fig. 4 Residual stress distributions of pipe weld(at section AA in Fig. 3)

3. 잔류응력 이완해석

용접 잔류응력 상태에서 두 가지 형태의 MSR 하중을 가하여 잔류응력의 이완형태를 분석하였다. 하중의 형태는 첫째, 가압기 설계시 내부에 가해지는 수압시험 압력(3125 psi), 약 2.197 kgf/mm² 를 기준으로 각각 80%, 100%, 150%와 200%의 압력을 내부에 가하였으며, 내압으로 인한 배관부 끝단에도 증가의 압력을 동시에 가하였다. 두 번째 하중의 형태는 배관부 끝단에 외부하중으로 노즐재질인 SA508 Gr.3 Cl.1의 항복

응력을 기준으로하여 각각 60%, 80%, 90%의 하중을 가하였으며, Fig. 5에 각각의 하중의 형태를 도식적으로 나타내었다.

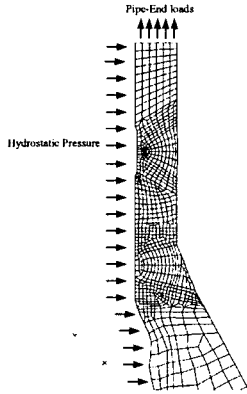


Fig. 5 Schematics of MSR loads

3.1 수압시험 압력변화에 따른 응력분포

수압시험에 내벽에 가해지는 압력의 변화를 기준으로 한 잔류응력의 분포특성을 살펴보면 Fig. 6과 같다.

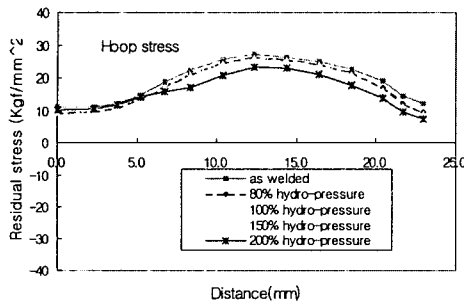


Fig. 6 Residual stress distributions for hydrostatic pressure variations

Fig. 6에는 원환응력의 변화를 나타내며 용접 후 잔류응력 값과 비교해 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기준 압력이 되는 수압 시험 압력자체가 항복응력의 15%미만으로 적은 값이며, 또한 내압과 동시에 배관끝단에 증가의 하중이 동시에 가해준 결과라고 보여진다.

3.2 배관 끝단 작용하중 변화에 따른 응력분포

배관 끝단에 재료의 항복응력에 비례하는 인장 하중을 가해준 결과 Fig. 7과 같은 잔류응력의 이완효과를 얻었다. 하중의 크기가 증가함에 따라 이완량이 증가하며 특히 내벽의 인장응력이 압축응력으로 변화함을 볼 수 있다. 이러한 효과는 초기의 잔류응력상태에 하중이 가해지면서 응력의 합이 항복을 초과하여 소성을 일으킨 결과

이며 피로의 측면에서 우호적인 결과로 생각된다.

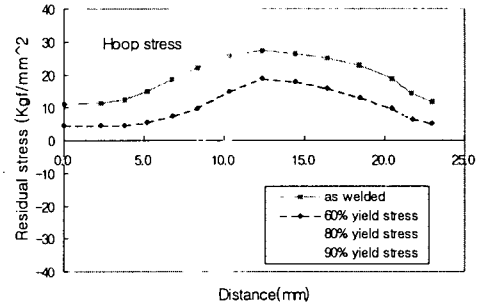


Fig. 6 Residual stress distributions for Pipe-end loads variations

4. 결 론

원전 가압기 분무노즐 부위의 잔류응력 해석을 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 또한 잔류응력 상태에 각각 수압시험 압력에 비례한 내압 하중 변화와 노즐 재질의 항복응력에 비례한 배관 끝단 하중을 변화시켜 잔류응력 변화를 분석하였다. 피로강도에 중요한 영향을 미치는 원환응력의 경우, 수압시험 변화에 기인한 잔류응력 이완량은 배관 끝단의 항복응력 비례하중을 가한 경우에 비해 상대적으로 적은 잔류응력의 이완량을 나타냄을 알 수 있었다. 외부 압축하중에 의한 응력의 이완특성도 고려하고 추후 비교하고자 한다.

참고문헌

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. 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
5. P. Dong, J. Zhang and P. J. Bouchard : Effects of Repair Weld Length on Residual Stress Distribution, *Transaction of the ASME*, 124 (2002)