

원자로 압력용기 원주방향 용접부의 잔류응력 해석

김종성*, 진태은*

Analysis of Residual Stress on Circumferential Weldment of Reactor Pressure Vessel

Jong Sung Kim, Tae Eun Jin

Keywords : Reactor Pressure Vessel(원자로 압력용기), 용접부(Weldment), 잔류응력(Residual Stress), FEM(유한요소법), Submerged Arc Weld(잠호 아크용접)

ABSTRACT

To perform the integrity evaluation of RPV more realistically, it is necessary to evaluate the metallurgical microstructure and residual stress considering more real phenomena such as multi-pass welding process and PWHT. Accordingly, firstly, this paper proposes the integrated assessment methodology systematically developed for residual stress on weldment of RPV by using thermodynamics, diffusion theory, finite element method and validation experiment. Also, the residual stress on circumferential weldment of reactor pressure vessel is calculated considering multi-pass welding process by the commercial finite element package, ABAQUS.

1. 서 론

원자로 압력용기의 가압열충격(PTS : Pressurized Thermal Shock) 해석 같은 건전성 평가를 보다 실제적으로 수행하기 위해서는 다층 용접 및 후열처리(PWHT : post welding heat treatment) 같은 보다 실제 현상을 고려하여 금속조직과 잔류응력을 평가하는 것이 필요하다. 그러나 용접현상의 복잡함 때문에 실제 용접과정을 모사하여 잔류응력을 계산하는 것은 용이하지 않기 때문에 원자로 압력용기의 건전성 평가에 대한 기존 연구들[1~3]은 잔류응력을 측정하거나 특정 함수의 형태로 가정하여 취급하고 있다.

따라서 잔류응력에 대한 용이하고 보다 실제적인 해석을 위해, 본 논문에서는 우선적으로 원자로 압력용기 용접부의 잔류응력에 대해 체계적으로 개발된 통합 평가 방법론을 제시하고자 한다.

이러한 통합 평가 방법론은 열역학, 확산이론, 유한요소법 및 타당성 실험을 이용한 온도해석, 금속조직 예측 및 잔류응력 해석으로 구성되어진다. 또한, 최종적으로 다층 용접 과정을 고려한 원자로 압력용기 원주방향 용접부의 온도분포 및 잔류응력 분포가 상용 유한요소법 패키지인 ABAQUS [4]를 이용하여 계산되어진다.

2. 본 론

2.1 해석방법론

Fig.1은 원자로 압력용기 용접부의 잔류응력에 대해 체계적으로 개발된 통합 평가 방법론을 도식적으로 보여주고 있다. Fig.1에서 보이는 바와 같이 온도해석, 금속조직 예측과 응력해석 부분으로 구성되어지며 각 부분들은 상호 연관되어진다.

* : 한국전력기술(주), 재료기술연구그룹

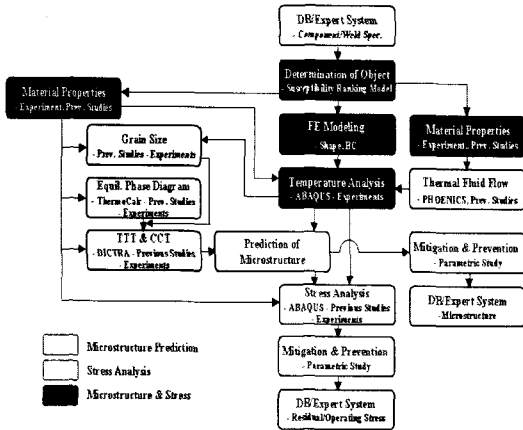


Fig. 1 Integrated assessment methodology

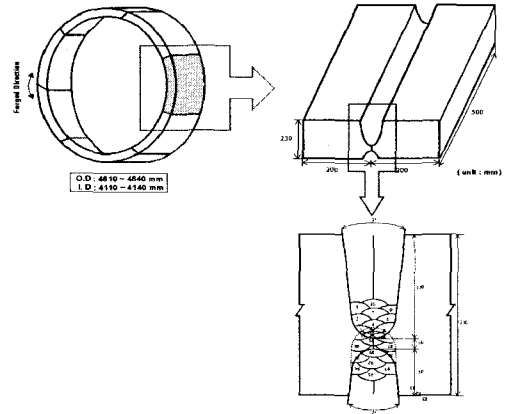


Fig. 2 Analysis model

용접 과정동안의 용접부 온도분포는 열전도도, 용접 Pool내 열 유체 유동, 화학반응 등을 고려하기 위하여 ABAQUS와 기존 연구결과들[5,6]을 이용하여 계산되어진다.

용접부의 금속조직을 예측하기 위해, 우선적으로 결정립 크기가 온도해석 결과와 기존 연구결과들 [7,8]에 의해 결정되어지며 탄화물 석출을 포함하는 평형 상태도가 ThermoCalc[9], 기존 연구들[10, 11]과 타당성 검증실험을 통해 결정되어진다. 결정립 크기, 평형 상태도, DICTRA[12] 및 기존 연구 결과들[13~15]을 통해 결정된 TTT(time temperature transformation) 선도는 Scheil-Avrami additivity 법칙[16~18]에 의해 CCT(Continuous Cooling Transformation) 선도로 변환되어진다. 최종적으로 이러한 CCT 선도에 온도해석 결과를 도하여 용접 완료 이후의 금속조직을 예측한다.

최종적으로 용접부의 잔류응력은 온도해석 결과, 금속조직 예측 결과, ABAQUS 및 타당성 검증 실험을 통해 계산되어진다.

2.2 해석

2.2.1 해석모델

해석모델은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 원자로 압력용기의 원주방향 용접부로서 모델은 SA 508 Class 3, 용접봉은 L-TEC 44/709-5이며SAW을 이용하여 내외면은 각각 39와 81 pass로 용접하였다.

Table 1은 SA508 Class 3의 화학조성을 제시하고 있으며 Table 2는 용접전류/전압, 예열/후열 처리 등 용접변수들을 제시하고 있다.

Table 1 Chemical composition of SA508 Class 3

El.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
wt%	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51	0.009

Table 2 Specifications of welding parameters

Wire size	Current	Voltage	Speed	Preheat temp.	Interpass temp.	PWHT
4mm	500-600A	28-32V	30-40 cm/min	121°C	200°C	615°C/40hr

2.2.2 재료물성치

Fig. 3은 SA508 Class3의 비열, 열전도도 및 밀도를 온도변화에 따라 제시하고 있다. 또한, Fig. 4에서는 SA508 Class3의 탄성계수, 항복응력 및 열팽창계수를 제시하고 있다. 프와송비는 0.3으로 가정하였으며 소성계수는 10%로 가정하였다.

2.2.3 유한요소 모델

Fig. 5는 해석모델의 유한요소모델로 4절점 축대칭 요소를 사용하였고 절점 수 및 요소 수는 각각 940과 830이다. 또한, 다층 용접과정을 모사하기 위해 ABAQUS의 Model Change 기능[4]을 이용하여 각 용접 Layer별로 부가 또는 삭제되어진다. 본 논문에서는 이미 유효성이 증명된 Lumped Model 기법[19]을 사용하였다. 따라서 본 논문에서는 외

면쪽 용접 경우 8 Layer로 내면쪽은 5 Layer로 용접되어진다고 가정하였다.

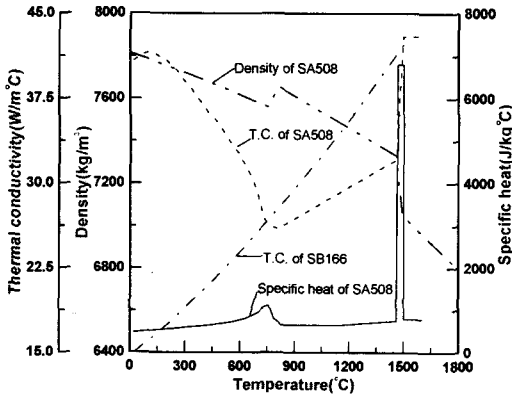


Fig. 3 Thermal-physical material properties of SA508

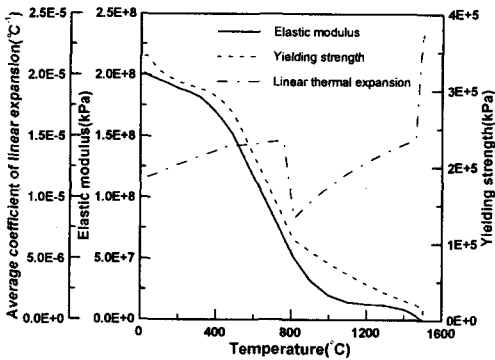


Fig. 4 Mechanical material properties of SA508

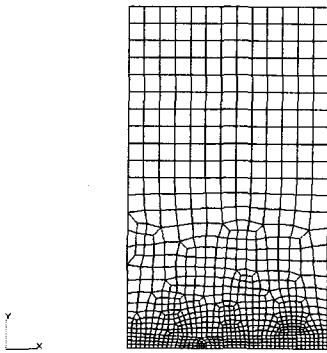


Fig. 5 Finite element model

2.2.4 경계조건

초기 온도는 모재의 경우 25°C에서 예열을 통해 121°C로 유지된다고 가정되며 용착되는 용착부의 온도는 액상선 온도보다 10°C 높은 1511.04°C로 가정하였으며 용접열에 의한 다른 열유속은 무시하였다. 또한, 용착되는 지속시간은 용접속도의 역수로 설정하였고 원자로 압력용기의 내외면에서 대기와의 열대류만 고려하였다.

기계적 경계조건은 Fig. 6과 같이 용접 중심선과 상부 면에서 y 축방향으로 구속되어진다고 가정하였다.



Fig. 6 Mechanical B.C.

2.2.5 온도해석

Fig. 7은 용접 Layer 5가 용착되어 Layer 6 용착 이전까지의 시간에 따른 온도변화를 보여주었고 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 시간 경과에 따라 용접부의 국부적인 고열이 확산되어 온도가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8은 외면 용접 Layer 1의 중심부에 위치한 절점 275에서의 시간에 따른 온도변화 값을 제시하고 있다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이 각 용접 Layer가 용착되는 것에 따라 온도가 증가하다가 감소하는 것을 반복함을 보여주고 있다.

Fig. 9는 외면 Layer 1 중심부의 절점 275와 Layer 1 열영향부에 위치한 절점 769에서의 시간에 따른 온도변화를 보여주었고 있다. 각 Layer 용착에 따라 동일한 시간대에서 두가지 모두 Peak 온도가 발생하며 열영향부에서 온도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

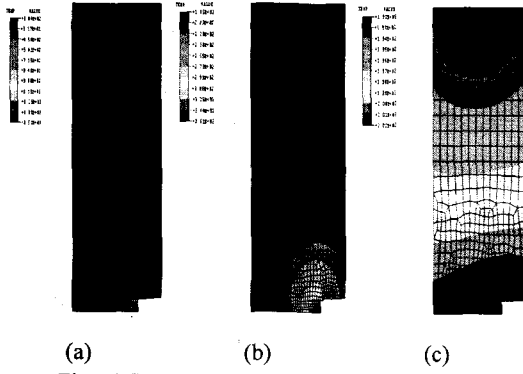


Fig. 7 Temperature distribution changes between layer 5 & 6 vs. time
 (a) Immediately after layer 5
 (b) 105sec after layer 5
 (c) Just before layer 6

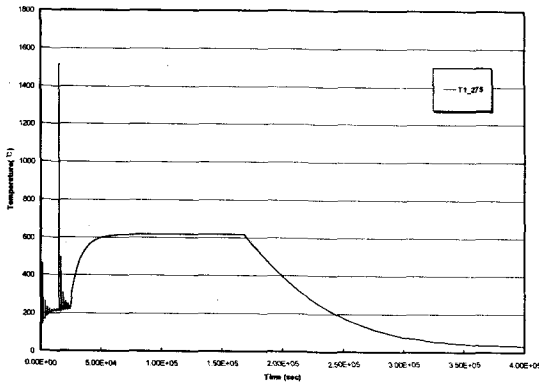


Fig. 8 Temperature change at center of layer 1 vs. time

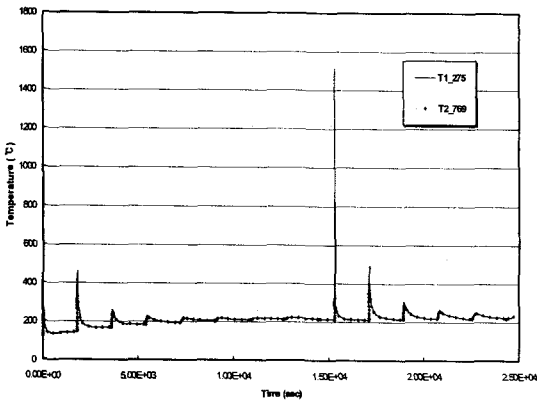


Fig. 9 Temperature changes at center & HAZ of layer 1 vs. time

2.2.6 금속조직 예측

금속조직 예측에 대한 내용은 동일 학회에서 발표할 이승건 등의 논문[20]에서 보다 자세히 서술되어 있으며 본 논문에서는 개략적인 연구방법만을 제시하고자 한다.

평형 변태점은 화학 포텐셜(chemical potential)을 활성화 계수(activity coefficient)에 대한 Wagner 표현[21]으로 가정하고 Richardson에 의해 제안된 subregular solution model[22]을 이용하고 각 변태점에서 화학 포텐셜이 동일하다고 설정하여 계산되어진다. 또한, Bainite와 Martensite는 각각 Steven과 Haynes[23], Kung과 Raymond[24]의 논문들에 따라 결정되어진다.

TTT 선도는 Victor등의 논문[13]에 제시된 식들에 의해 결정되어지며 Scheil-Avrami additivity rule[16~18]에 의해 CCT로 변화되어진다. 최종적으로는 CCT 선도에 온도해석 결과를 도출하여 최종적으로 나타내는 금속조직을 예측할 수 있게 된다. 본 해석모델에 대해서는 예측 결과 PWHT 이전의 금속조직은 Bainite임을 알 수 있다.

2.2.7 잔류응력 해석

잔류응력의 정밀한 해석을 위해서는 상변태에 기인하는 냉각과정 동안의 상변태 변형률과 액상시 변형을 소멸에 기인하는 어닐링 변형률 고려하여야만 하나 현재까지 연구결과는 이들 변형률을 고려하지 못하였으며 향후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

Fig. 10은 용접이후의 축방향과 원주방향 잔류응력 분포를 제시하고 있다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이, bending type 보다는 self-equilibrating 형태의 잔류응력 분포가 나타남을 알 수 있다. 또한, 원판 응력의 경우 내부에서는 압축응력이 내외 표면에서는 인장응력이 작용되고 특히 HAZ부에서 가장 큰 인장응력이 작용됨을 알 수 있다.

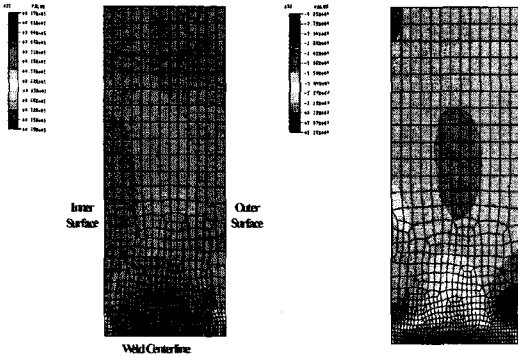


Fig. 10 Residual stress distributions

3. 결론

원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대한 잔류응력 해석 결과 다음과 같은 결론과 향후 계획을 도출하였다.

- self-equilibrating 형태의 잔류응력 분포가 발생한다.
- 원환 잔류응력 경우, 내부에서는 압축응력이 내외 표면에서는 인장응력이 작용한다.
- HAZ부 표면에서 최대 원환 잔류응력이 발생한다.
- 보다 정밀한 해석을 위해서는 향후 상변태 변형률과 어닐링 변형률 고려가 필요하다.
- 향후 계산된 잔류응력에 대한 타당성 검토를 위해 잔류응력 측정실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] T.L. Dickson, et al., 1999, "Revisiting the integrated pressurized thermal shock studies of an aging pressurized water reactor," ASME PVP, Vol.388, pp.79-89.

[2] T.L. Dickson, et al., 1998, The Inclusion of Weld Residual Stress in Fracture Margin Assessments of Embrittled Nuclear Reactor Pressure Vessels, ORNL/CP-96684.

[3] 정성규 등, 2000, "원자로 압력용기의 확률론적 파괴해석 프로그램 개발을 위한 가압열충격 심사 기준 검토," 한국에너지공학회, 춘계학술발표회, pp. 95-100.

[4] ABAQUS User's Manual, Ver.5.8, HKS, Inc., USA.

[5] T. Fuhrich, et al., 1999, "Marangony effect in deep

penetration laser welding of steel," 18th Int. Congress on Applications of Laser & Electri-Optics, San Diego, Nov. 15-18.

[6] R.T.C. Choo and J. Szekely, 1991, "The effect of gas shear stress on marangoni flows ion arc welding", Welding Research Supplement, pp. 223-s-233-s, September.

[7] R.E. Reed-Hill, 1973, Physical Metallurgy Principles, 3rd Edition, p.256.

[8] H. Hu and B.B. Rath, 1970, Metall. Trans., Vol.1, pp.3181.

[9] Thermo-Calc, Users' Guide, Version M, Royal Institute of Technology, Sweden.

[10] J.S. Kirkaldy and E.A. Bagains, 1978, Metall. Trans. A, Vol.9A, pp.495-501.

[11] K. Hashiguchi, 1984, CALPHAD, Vol.8(2), pp.173-186.

[12] DICTRA, Users' Guide, Royal Institute of Technology, Sweden.

[13] M. Victor Li, et al., 1998, "A computational model for the prediction of steel hardenability," Metallurgical and Materials Trans. B, Vol. 29B, pp.661-672.

[14] S.S. Babu, 1992, Acicularferrite and Bainite in Steels, Ph.D Thesis, University of Cambridge, UK.

[15] M. Takahashi and Bhadeshia, 1991, Materials Transactions, Vol.32, pp.689-696.

[16] E.Scheil, 1935, "Anlaufzeit der austenitum-wandlung," Arch. Eisenhüttenwes, Vol.8, pp.565.

[17] M. Avrami, 1939, "Kinetics of phase change I," J.Chem. Phys., Vol.7, pp.1103.

[18] M. Avrami, 1940, "Kinetics of phase change II," J. Chem. Phys., Vol.8, pp.212.

[19] P. Dong and F.W. Brust, 2000, "Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components: a millennium review and beyond," J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, Vol.122, pp.329-338.

[20] 이승진 등, 2001, "원자로 압력용기 용접 열영향부의 미세조직 및 재료물성 예측," 대한기체학회 춘계학술대회, 제주대학교 (발표예정).

[21] C.Wagner, Thermodynamics of Alloys, 1952, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA.

[22] F.D. Richardson, 1953, J. Iron Steel Inst., Vol.175, pp.33-51.

[23] W. Steven and A.G. Haynes, 1956, J. Iron Steel Inst., Vol.183, pp.349-359.

[24] C.Y. Kung and J.J. Rayment, 1982, Metall. Trans. A, Vol.13A, pp.328-331.