

동적 유한요소 해석을 통한 용접 잔류응력 이완에 미치는 레이저 피닝 변수의 영향 고찰

김중성

순천대학교, 기계공학과

Investigation on the Effect of Laser Peening Variables on Welding Residual Stress Mitigation Using Dynamic Finite Element Analysis

Jong Sung Kim

Department of Mechanical Engineering, Suncheon National University

Abstracts

현재 가동 중인 몇몇 가압 경수로 원전 안전 1등급 설비의 이중금속 용접부는 일차수응력부식균열(PWSCC : Primary Stress Corrosion Cracking) 발생의 세가지 조건(민감 재질, 부식 환경, 인장응력)을 동시에 충족하고 있다. 즉, 이중금속 용접부는 PWSCC에 민감한 재질인 Alloy 600 계열 합금으로 제작 또는 용접되어 있으며 고온 수화학 부식 환경 하에 놓여있다. 아울러 오스테나이트 스테인리스강의 예민화 예방을 위한 용접 후열처리 미실시로 높은 인장 용접 잔류응력이 작용하고 있다. 이러한 이중금속 용접부의 특성상 PWSCC가 발생할 잠재성이 있을 뿐만 아니라 국내외적으로 Alloy 600 계열 합금으로 제작 및 용접된 가압 경수로 원전 안전 1등급 설비의 이중금속 용접부에 실제 PWSCC가 발생된 사례들이 다수 보고되고 있다. 운전 환경 및 재질 변화 없이 PWSCC 발생을 예방하기 위해서는 인장 잔류응력을 이완시켜 낮은 인장 또는 압축 응력화하여야 한다. 이러한 인장 잔류응력 이완방법들로는 PWOL(Pre-emptive Weld Overlay), 레이저 피닝(Laser Peening), MSIP(Mechanical Stress Improvement Process), 워터 제트 피닝(Water Jet Peening), IHSI(Induction Heating Stress Improvement) 방법들이 있는데 공정 시간이 짧고 열 에너지 원이 필요 없으며 전체적인 소성 변형을 야기시키지 않는 레이저 피닝을 본 연구의 대상 방법으로 한다.

본 연구에서는 동적 유한요소 해석을 통해 용접 잔류응력을 이완시키는 레이저 피닝의 효과를 검증하고 용접 잔류응력에 미치는 레이저 피닝 변수의 영향을 고찰하고자 한다. 내부 보수용접이 수행된 경수로 원전 가압기 노즐 이중금속 용접부에 레이저 피닝을 적용한 경우에 대해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 동적 유한요소해석을 수행한 결과, 고온 수화학 일차수와 접하는 Alloy 600 계열 합금 내면에서의 인장 잔류응력이 상당히 이완됨을 확인하였다. 또한, 최대충격 압력이 증가할수록, 충격압력 지속시간이 증가할수록, 레이저 스팟 직경이 증가할수록 내표면 인장 잔류응력 이완 정도는 감소하나 이완되는 영역의 깊이는 증가함을 알 수 있다. 또한, 레이저 피닝 방향이 잔류응력 이완에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다.

Key Words : Laser Peening, Welding Residual Stress, Dissimilar Metal Welds, Dynamic Finite Element Analysis

1. 장 서 론

현재 가동 중인 몇몇 가압 경수로 원전 안전 1등급 설비의 이중금속 용접부는 일차수용력부식균열(PWSCC : Primary Stress Corrosion Cracking) 발생의 세가지 조건(민감 재질, 부식 환경, 인장응력)을 동시에 충족하고 있다. 즉, 이중금속 용접부는 일차수용력부식균열에 민감한 재질인 Alloy 600 계열 합금으로 제작 또는 용접되어 있으며 고온 수화학 부식 환경 하에 놓여있다. 아울러 오스테나이트 스테인리스 강의 예민화 예방을 위한 용접 후열처리 미실시로 높은 인장 용접 잔류응력이 작용하고 있다. 이러한 이중금속 용접부의 특성상 일차수용력부식균열이 발생할 잠재성이 있을 뿐만 아니라 국내외적으로 Alloy 600 계열 합금으로 제작 및 용접된 가압 경수로 원전 안전 1등급 설비의 이중금속 용접부에 실제 일차수용력부식균열이 발생된 사례들이 다수 보고되고 있다¹. 운전 환경 및 재질 변화 없이 일차수용력부식균열 발생을 예방하기 위해서는 인장 잔류응력을 이완시켜 낮은 인장 또는 압축 응력화하여야 한다. 이러한 인장 잔류응력 이완방법들로는 PWOL(Pre-emptive Weld Overlay), 레이저 피닝(Laser Peening), MSIP (Mechanical Stress Improvement Process), 워터 제트 피닝(Water Jet Peening), IHSI(Induction Heating Stress Improvement) 방법들이 있는데 공정 시간이 짧고 열 에너지 원이 필요 없으며 전체적인 소성 변형을 야기시키지 않는 레이저 피닝을 본 연구의 대상 방법으로 한다.

본 연구에서는 동적 유한요소 해석을 통해 용접 잔류응력을 이완시키는 레이저 피닝의 효과를 검증하고 용접 잔류응력에 미치는 레이저 피닝 변수의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 장 본 론

2.1 절 해석 대상

그림 1은 본 연구의 해석 대상인 국내 가동 중인 가압경수로 원전 가압기 안전노즐 이중금속 용접부의 형상을 제시하고 있다². 각 부위별 재질로는 노즐은 SA508 Gr.3, Cl.1, 버터링과 버터링-안전단의 용접금속은 Alloy 82/182, 안전단은 SA182 F316, 안전단-배관의 용접금속은 ER316L, 배관은 SA376 TP316이 사용되었다. 내면 보수용

접을 실시하지 않으면 PWSCC 발생을 유발시킬 만한 인장 잔류응력이 크게 발생하지 않으므로 본 평가에서는 내면 보수용접을 수행하였다고 가정하였으며 적용한 예방정비는 레이저 피닝으로서 그림 2는 본 연구에서 적용할 레이저 피닝 방안 개요를 제시하고 있다^{3,4}.

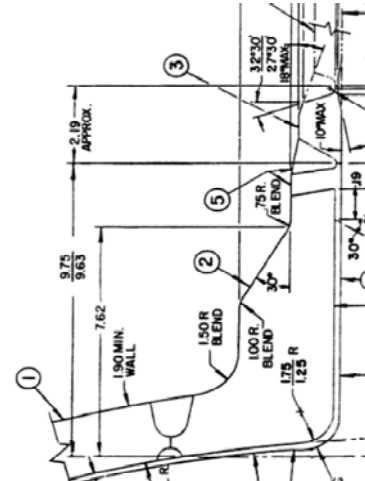


그림 1 가압경수로 원전 가압기 안전노즐 이중금속 용접부 형상

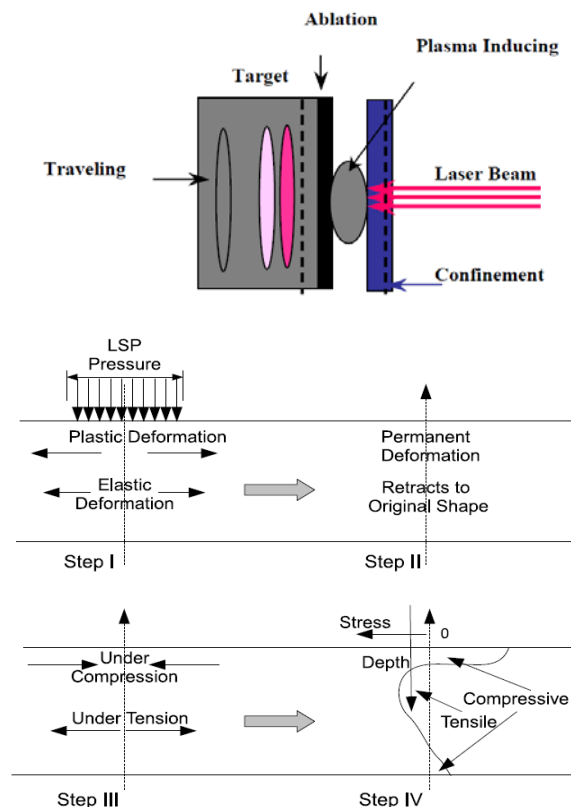
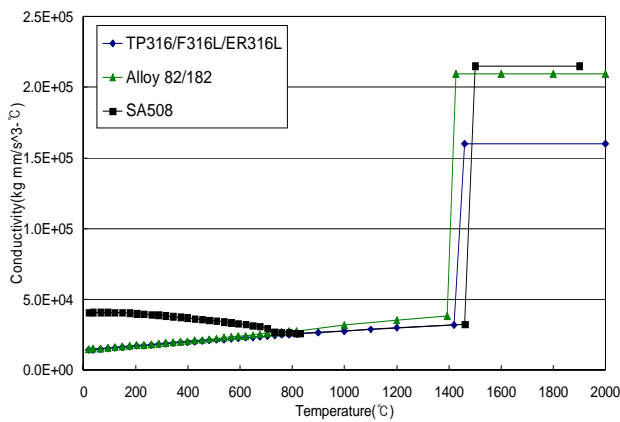


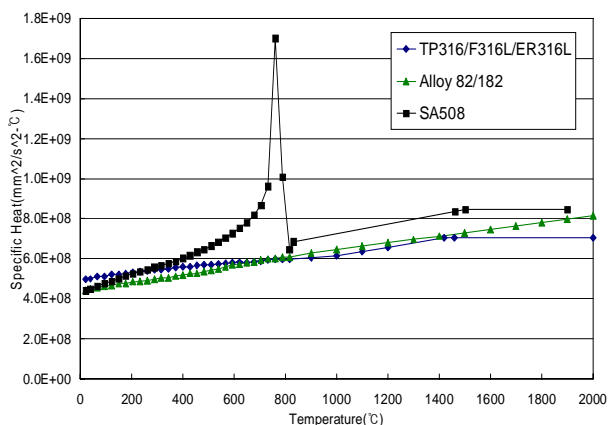
그림 2 레이저 피닝 방안 개요

온도 및 응력 해석에 사용된 재료물성치는 그림 3에서 제시한 바와 같이 ASME B&PV Code, Sec. II, Part D⁵, 기존 연구들⁶⁻⁸ 및 재료 공급자가 제공한 값⁹을 사용하였고 밀도는 온도에 무관하게 일정하게 설정하였으며(F316L, TP316, ER316L은 $7.97 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$, Alloy 82/182는 $8.47 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$, SA508은 $7.83 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$) 온도에 따른 밀도의 변화는 온도에 따른 비열 변화에 반영하였다. 프와송 비는 온도에 무관하게 일정한 값을 갖도록 설정하였다(F316L, TP316, ER316L은 0.27 및 Alloy 82/182는 0.27을, SA508 Gr.3, Cl.1은 0.29 사용). 탄성-완전 소성 거동을 사용하였다.

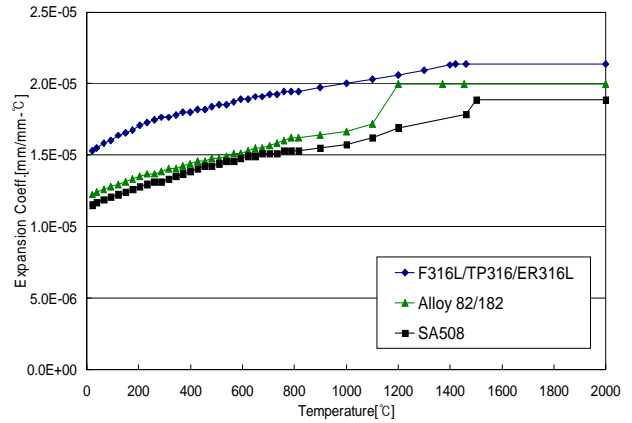
레이저 피닝의 경우, 충격파가 작용하기 때문에 소성 거동에 대한 변형률 속도의 영향을 고려하였다. 오스테나이트 스테인리스 강과 니켈 기 합금은 그림 4(a)에 제시된 경향¹⁰을 따른다고 가정하였으며 저합금강은 그림 4(b)에 제시된 경향¹¹을 따른다고 가정하였다. SA508 Gr.3 Cl.1에 대해서는 그림 4(b)의 YST-80의 결과를 이용하였다.



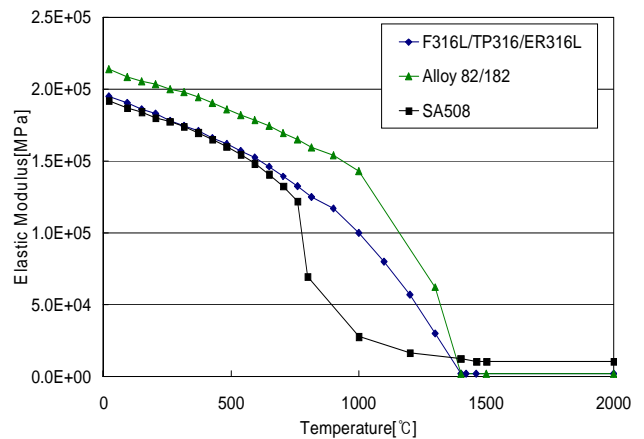
(a) 열전도도



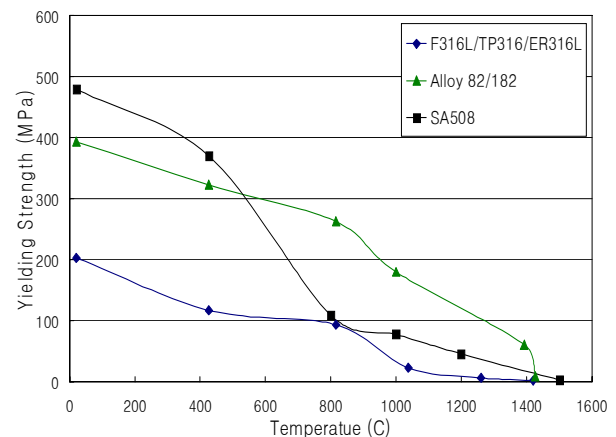
(b) 비열



(c) 열팽창계수



(d) 탄성계수

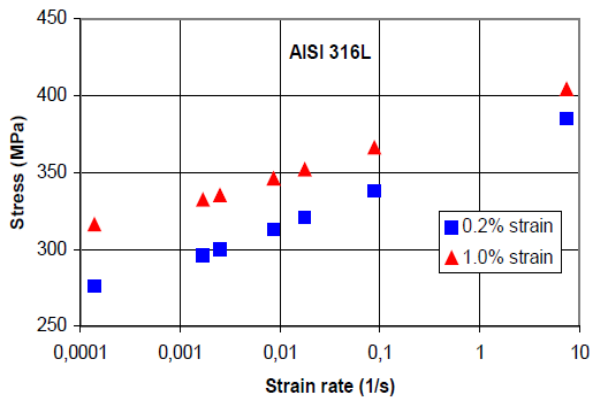
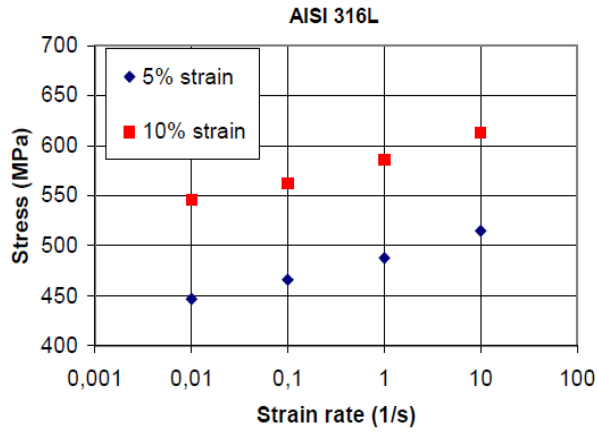


(e) 항복강도

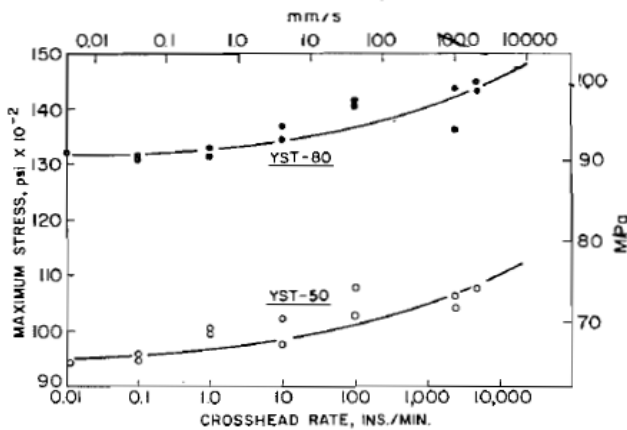
그림 3 해석에 사용된 재료물성치

본 해석에서는 내면 보수용접 잔류응력 해석을 우선적으로 수행한 후 레이저 피닝 방안 적용에 따른 잔류응력 해석을 수행한다. 따라서 경계조건은 내면 보수용접 및 레이저 피닝 방안 적용의 각 경우에 대해 제시한다.

내면 보수용접의 경우, 그루브 부위는 용접금



(a) 스테인리스 강, 니켈기 합금



(b) 저합금강

그림 4 변형률 속도에 따른 동적 항복강도 변화

속의 용착 동안에는 단일상태로 가정한다. 한편 용접금속은 액상선 온도보다 높은 1500°C 정도의 높은 온도로 용착된다고 가정한다. 용착시 입열량은 용접시방서 상의 전압, 전류 값을 식 (1), (2)에 대입하여 계산된 값이 용착시간 동안 작용

한다고 가정한다.

$$q_{vol}=0.3\eta EI/V \tag{1}$$

$$q_{surf}=0.7\eta EI/A \tag{2}$$

여기서 q_{vol} 는 용접 패스 체적에 작용하는 체적 열유속(J/m³sec), q_{surf} 는 용접 패스가 용착되는 표면에 작용하는 표면 열유속(J/m²sec), V는 단위 용접 패스당 체적(m³), A는 단위 용접 패스당 표면 열유속이 가해지는 표면적(m²)이다. η 는 효율, E는 전압, I는 전류이다.

그림 5는 내면 보수용접 및 레이저 피닝 방안 적용시 변위 구속조건을 보여주고 있다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 배관 끝단면은 배관 중심점과 x, y방향 변위의 자유도를 연계시켰으며 x, y, z방향 모멘트가 발생하지 않는다고 가정하였다. 노즐 절단면은 y방향 변위를 구속시켰다.

그림 6은 레이저 피닝 적용시 작용하는 충격하중이 작용하는 경계조건을 제시하고 있다. 이러한 충격하중은 최대 압력 6GPa로 그림 7과 같이 작용하며 레이저 스팟 크기는 직경 2mm 정도로 가정하였다^{4,12}.

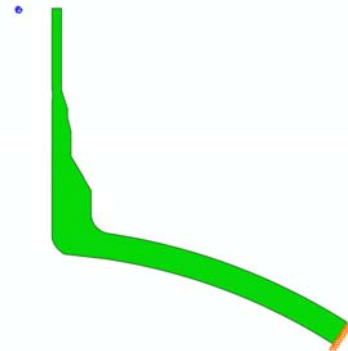


그림 5 내면 보수용접 및 레이저 피닝 방안 적용시 변위 구속조건

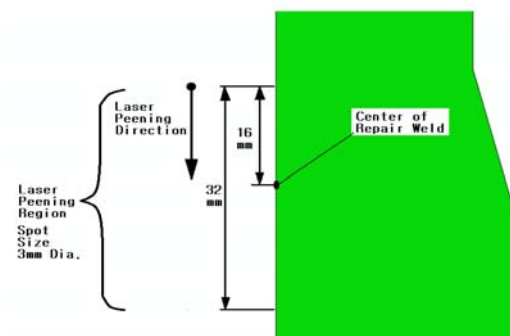


그림 6 레이저 피닝 동안의 충격하중 경계조건

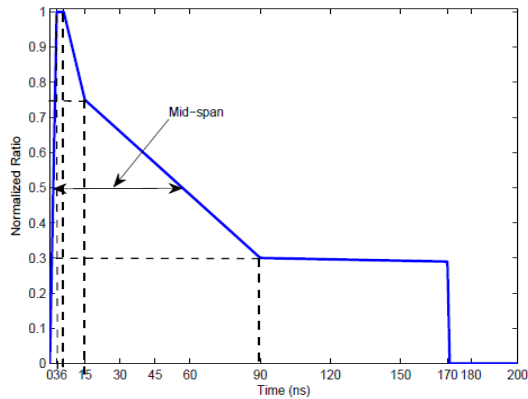


그림 7 레이저 피닝 동안 충격하중의 시간 변이

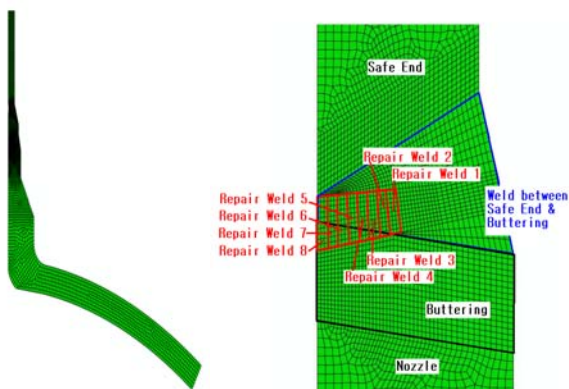


그림 8 가압기 안전 방출 노즐 내면 보수용접 이중금속 용접부의 축대칭 이차원 유한 요소 모델

2.2 절 유한요소 모델링

그림 8은 온도 및 잔류응력 해석을 위해 상용 프로그램인 PATRAN¹³을 이용하여 모델링한 축대칭 유한요소 모델이다. 유한요소 모델은 요소특성이 각각 4절점 요소이다. 용접부는 좀 더 세밀하게 유한요소 모델링을 수행하였다. 그림 8에 제시한 바와 같이 내면 보수용접 패스는 8패스로 모델링하였다.

2.3 절 잔류응력 해석 및 레이저 피닝 효과 검증

ABAQUS¹⁴를 이용, 열전도 기반 온도해석 및 축대칭 이차원 탄소성 응력해석을 수행한다. 내면 보수용접은 정적(Implicit) 해석을 수행하였으며 레이저 피닝은 동적(Implicit) 해석을 수행하였다.

그림 9는 내면 보수용접 이후의 잔류응력 분포

를 제시하고 있다. 그림 10은 레이저 피닝 적용 이후의 잔류응력 분포를 제시하고 있다. 그림 9와 10을 상호 비교하면 다음과 같은 사실을 도출할 수 있다.

- 레이저 피닝은 내표면의 잔류응력을 저감하는 예방정비 효과가 있음
- 레이저 피닝은 주로 내표면 근처 영역의 잔류응력을 저감시킴

그림 11은 레이저 피닝 방안 적용에 따른 내표면 선 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 11에서 보이는 바와 같이 레이저 피닝 적용시 내표면의 잔류응력은 저감하나 진동하는 경향을 보인다. 그림 12는 레이저 피닝 방안 적용에 따른 내면 보수용접 중앙선(WCL : Weld Center Line) 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 12에서 보이는 바와 같이 레이저 피닝 적용시 내면 보수용접 중앙선 상의 잔류응력이 저감되는데 주로 내표면쪽의 잔류응력이 저감된다.

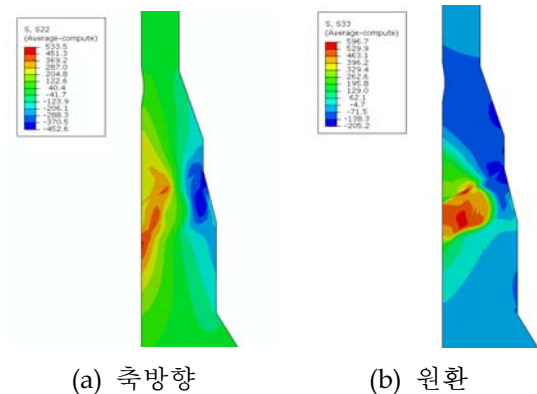


그림 9 내면 보수용접 이후의 잔류응력 분포

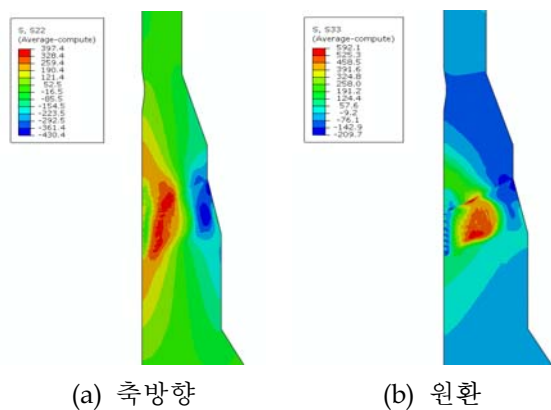
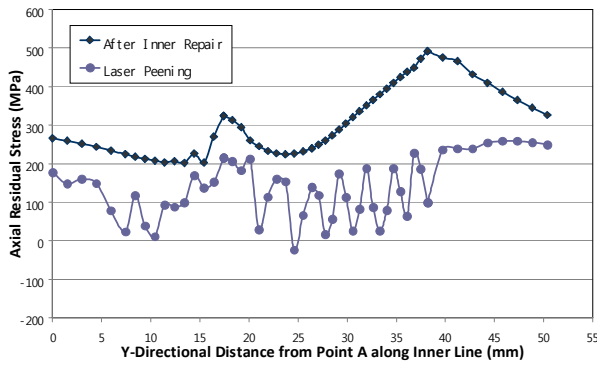
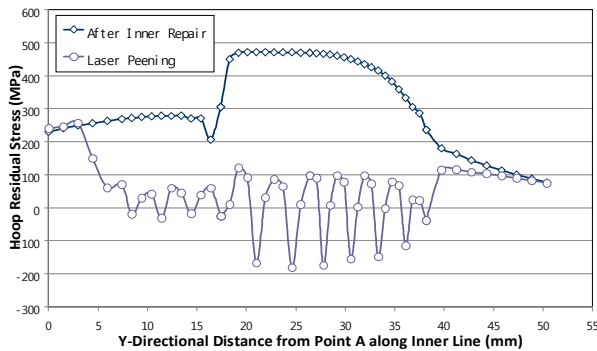


그림 10 레이저 피닝 적용 이후의 잔류응력 분포

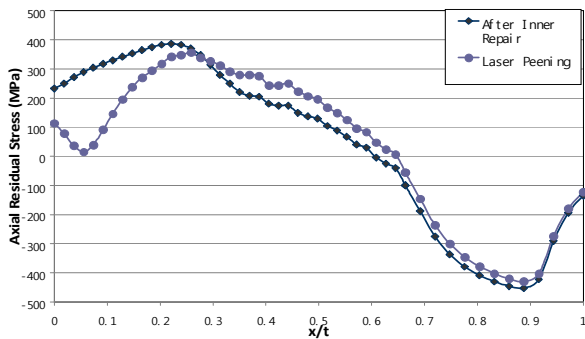


(a) 축방향

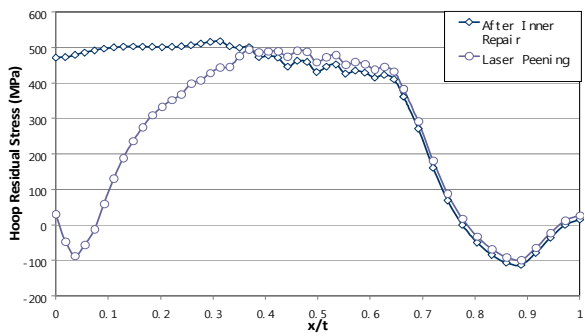


(b) 원환

그림 11 내표면 선 상의 잔류응력 분포 변화



(a) 축방향



(b) 원환

그림 12 보수용접 중앙선 상의 잔류응력 변화

2.4 절 잔류응력 이완에 미치는 레이저 피닝 변수의 영향 고찰

표 1은 레이저 피닝 변수의 영향을 고찰하기 위해 사용된 각각의 변수 값들을 제시하고 있다.

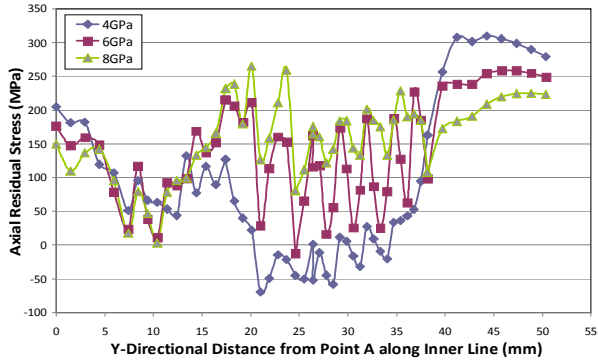
표 1 레이저 피닝 변수의 영향을 고찰하기 위한 각각의 변수 값들

경우	최대 충격압력	충격압력 지속시간	레이저 스팟 직경	피닝 방향
1-1	4GPa	170 μ s	2mm	안전단→노즐
1-2	6GPa	170 μ s	2mm	안전단→노즐
2-2				
3-2				
4-2				
1-3	8GPa	170 μ s	2mm	안전단→노즐
2-1	6GPa	85 μ s	2mm	안전단→노즐
2-3	6GPa	340 μ s	2mm	안전단→노즐
3-1	6GPa	170 μ s	1mm	안전단→노즐
3-3	6GPa	170 μ s	4mm	안전단→노즐
4-3	6GPa	170 μ s	2mm	노즐→안전단

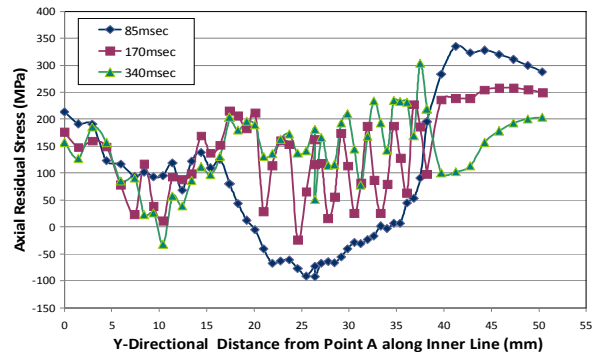
그림 13은 최대 충격압력 변화에 따른 내표면 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 14는 최대 충격압력 변화에 따른 내면 보수용접 중앙선 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 13과 14에서 보이는 바와 같이 최대 충격압력이 증가할수록 내표면에서의 이완효과는 감소하나 이완이 발생하는 영역의 깊이는 증가함을 알 수 있다.

그림 15는 충격압력 지속시간 변화에 따른 내표면 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 16은 충격압력 지속시간 변화에 따른 내면 보수용접 중앙선 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 15와 16에서 보이는 바와 같이 충격압력 지속시간이 증가할수록 내표면에서의 이완효과는 감소하나 이완이 발생하는 영역의 깊이는 증가함을 알 수 있다.

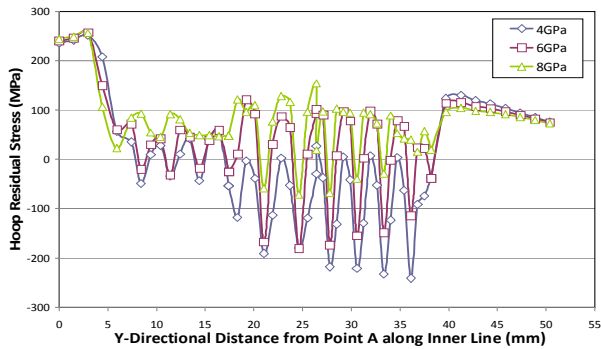
그림 17은 레이저 스팟 직경 변화에 따른 내표면 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 18은 레이저 스팟 직경 변화에 따른 내면 보수용접 중앙선 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 17과 18에서 보이는 바와 같이 레이저 스팟 직경이 증가할수록 내표면에서의 이완효과는 감소하나 이완이 발생하는 영역의 깊이는 증가함을 알 수 있다.



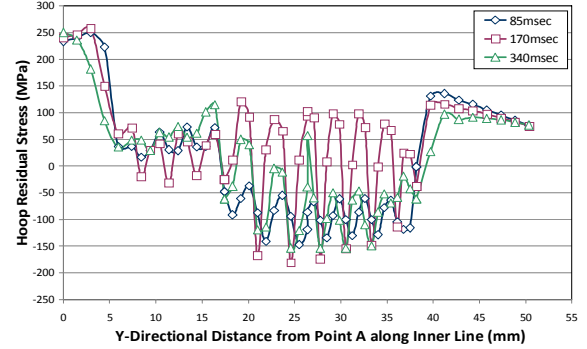
(a) 축방향



(a) 축방향



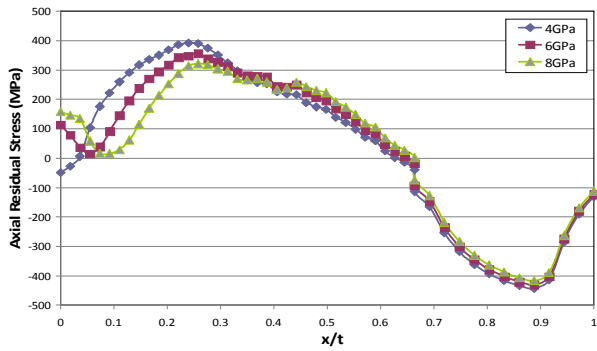
(b) 원환



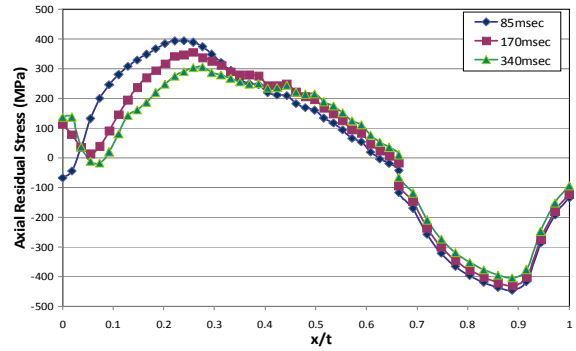
(b) 원환

그림 13 내표면 잔류응력 분포 vs. 최대충격압력

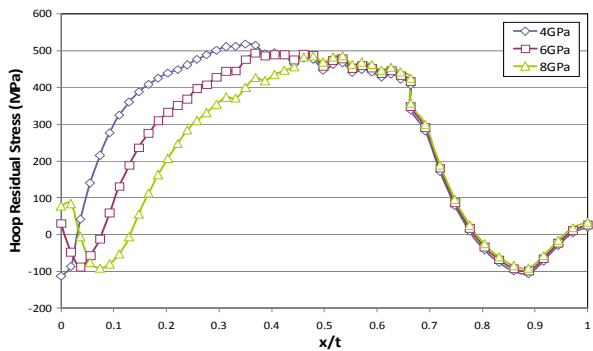
그림 15 내표면 잔류응력 분포 vs. 압력지속시간



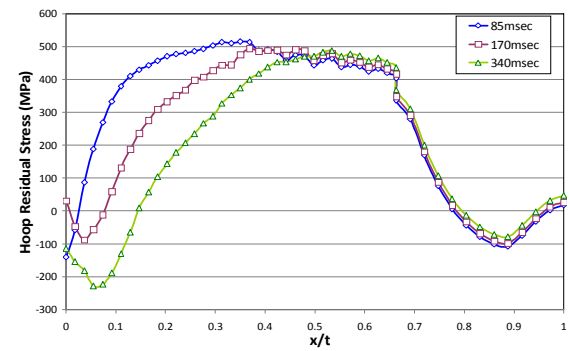
(a) 축방향



(a) 축방향



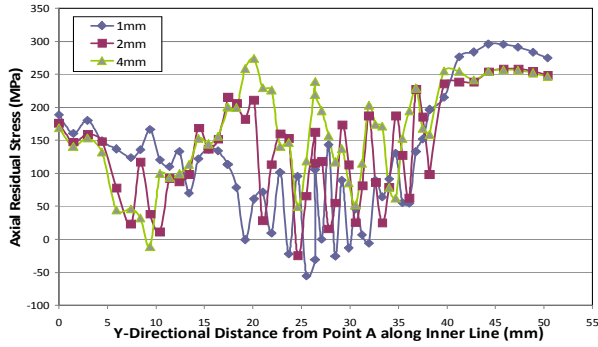
(b) 원환



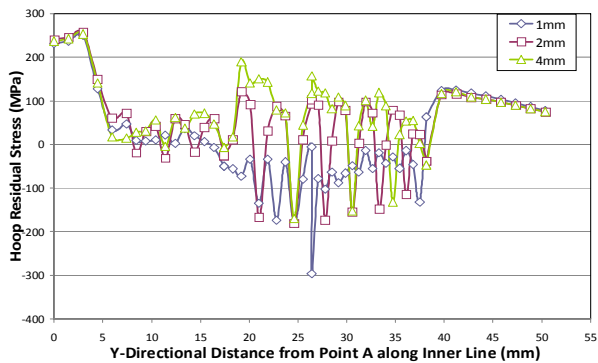
(b) 원환

그림 14 WCL 상의 잔류응력 vs. 최대 충격압력

그림 16 WCL 상의 잔류응력 vs. 압력지속시간

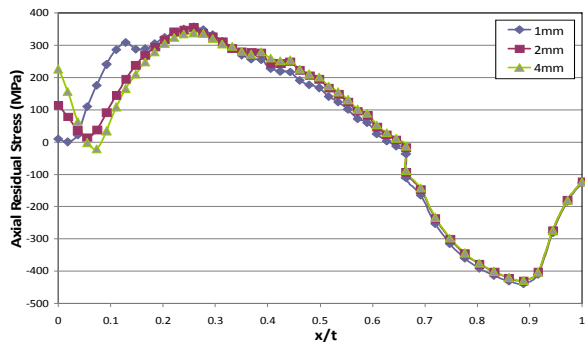


(a) 축방향

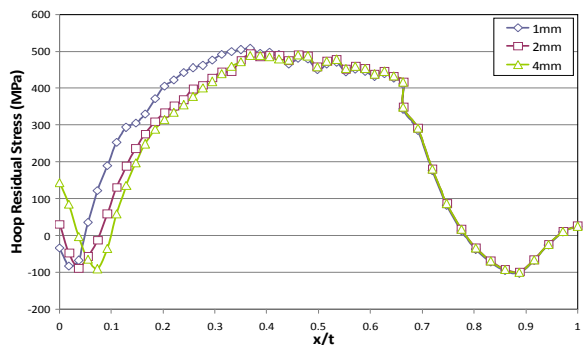


(b) 원환

그림 17 내표면 잔류응력 분포 vs. 스팟 직경



(a) 축방향



(b) 원환

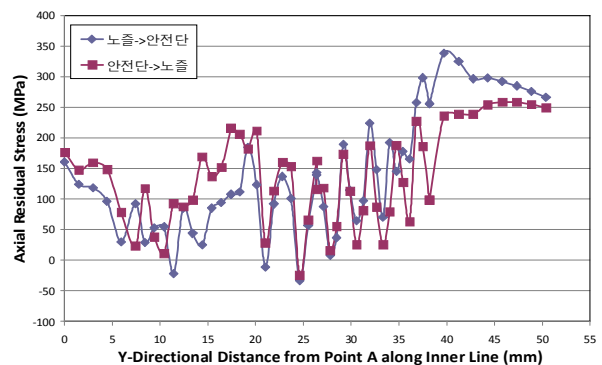
그림 18 WCL 상의 잔류응력 vs. 스팟 직경

그림 19는 레이저 피닝 방향 변화에 따른 내표면 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림 20은 레이저 피닝 방향 변화에 따른 내면 보수용접 중앙선 상의 잔류응력 분포 변화를 보여주고 있다. 그림들에서 보이는 바와 같이 레이저 피닝 방향의 영향은 미미함을 알 수 있다.

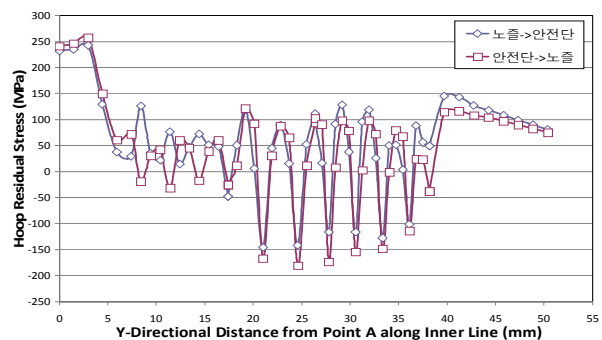
3. 결론

경수로 원전 가압기 노즐 이중급속 용접부의 용접 잔류응력의 이완에 대한 레이저 피닝의 효과와 레이저 피닝 변수의 영향을 동적 유한요소 해석을 통해 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 레이저 피닝은 주로 내표면 근처 영역의 잔류응력만을 저감시키는 예방정비 효과가 있다.
- 2) 최대충격압력이 커질수록, 충격압력 지속시간이 길어질수록, 레이저 스팟 직경이 커질수록, 내표면의 잔류응력 이완효과는 감소하나 이완이 발생하는 영역의 깊이는 증가한다.
- 3) 레이저 피닝 방향이 잔류응력 이완정도에 미치는 영향은 미미하다.

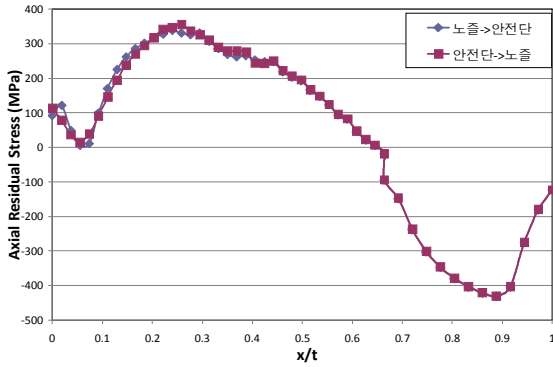


(a) 축방향

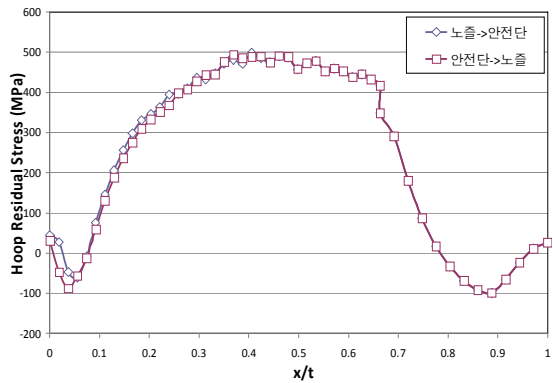


(b) 원환

그림 19 내표면 잔류응력 분포 vs. 피닝 방향



(a) 축방향



(b) 원환

그림 20 WCL 상의 잔류응력 vs. 피닝 방향

참고 문헌

1. U.S. NRC, U.S. Plant Experience with Alloy 600 Cracking and Boric Acid Corrosion of Light-Water Reactor Pressure Vessel Materials, NUREG-1823, 2005.
2. Westinghouse, Model F Series 84 Pressurizer Stress Report for Korea Electric Company Kori Unit 6, Rev.2, 1988.
3. M. Srinivasan, Finite Element Simulation of Laser Shock Peening Process, a Thesis of Master of Science, University of Cincinnati, 2008.
4. G. Singh, Effective Simulation and Optimization of Laser Peening Process, a Thesis of Doctor of Philosophy, Wright State University, 2009.
5. ASME B&PV Code Committee, ASME B&PV Code, Sec.II, Part D, 2001.
6. J. Lee, et al. : Mechanical Properties Evaluation in Inconel 82/182 Dissimilar Metal Welds, Proceedings of SMiRT19, 2007.
7. Battelle, Investigation of Weld Residual Stresses and Local Post-Weld Heat Treatment, Final PVRC JIP Report, 2002.

8. EU JRC Institute for Energy, Protocol for Finite Element Simulations of the NET Single-Bead-on-Plate Test Specimen, 2004.
9. Huntington Alloys. Inc., CMTR, 1980.
10. Hans Nordberg, Note on the Sensitivity of Stainless Steels to Strain Rate, Avesta Polarit Research Foundation, Research Report No 04-0-1, March 2004.
11. R.G. Davies and C.L. Magee, The Effect of Strain Rate Upon the Bending Behavior of Materials, Trans. of ASME, J. of Engineering Materials and Technology, Vol.99, pp.47-51, 1977
12. K. Ding and L. Ye, Laser Shock Peening : Performance and Process Simulation, CRC, WP
13. MSC, PATRAN User's Manuals, Ver.2005 r2, 2005.
14. Simulia, ABAQUS User's Manuals, Ver.6.8, 2009.