

# 용접 잔류응력 모사를 위한 시편 설계

김진원<sup>†</sup> · 박종선\* · 이경수\*\*

조선대학교 원자력공학과 · \*조선대학교 대학원 · \*\*한전 전력연구원  
(2008. 9. 17. 접수 / 2009. 2. 2. 채택)

## Design of a Laboratory Specimen for Simulation of Weld Residual Stress

Jin Weon Kim<sup>†</sup> · Jong Sun Park\* · Kyoungsoo Lee\*\*

Department of Nuclear Engineering, Chosun University

\*Graduate School, Chosun University

\*\*Korea Electric Power Research Institute

(Received September 17, 2008 / Accepted February 2, 2009)

**Abstract** : The objective of this study is to design a laboratory specimen for simulating residual stress of circumferential butt welding between pipes. Specimen type and method to generate residual stress were proposed based on the review of prior studies and parametric finite element analysis. To prove the proposed specimen type and loading method, the residual stress was generated using the designed specimen by applying proposed method and was measured. The measured residual stress using X-ray diffraction reasonably agreed with the results of finite element analysis considered in the specimen design. Comparison of residual strains measured at several locations on the specimen and given by finite element simulation also showed good agreement. Therefore, it is indicated that the designed specimen in this study can reasonably simulate the axial residual stress of a circumferential butt welding of pipe.

**Key Words** : residual stress, simulated specimen, weld, single grooved plate specimen

### 1. 서론

용접부에서 잔류응력은 용접 구조물의 건전성을 저하시키는 주요 원인 중 하나로 알려져 있다. 특히, 원자력발전소 1차 계통 이종금속 용접부에서 발견되고 있는 1차 계통수 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)은 이종금속간 용접에 따른 용접부의 높은 잔류응력에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>. 용접부의 잔류응력은 균열 발생 뿐 아니라 균열의 성장 거동에도 영향을 미치기 때문에 용접부의 균열 안정성 평가에 직접적으로 영향을 미친다<sup>3)</sup>. 따라서, 용접부에서 잔류응력의 크기와 분포를 정확히 파악하고, 이것을 균열 안정성 평가 절차에 적절히 반영하는 것은 용접부의 건전성 확보 측면에서 매우 중요하다.

최근 이종금속 용접부에 대한 잔류응력 평가 및 측정에 대한 신뢰성 향상을 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다<sup>4,5)</sup>. 또한, 잔류응력이 용접부 균열의

거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 연구들도 활발히 진행되고 있다<sup>3,6,7)</sup>. 그러나, 실제 용접부에서 잔류응력을 측정하고 평가하는 데는 여러 가지 불확실성이 존재하기 때문에 잔류응력의 크기와 분포를 정확히 파악하기 어렵다. 또한, 용접부에서 시편을 채취하여 균열 거동을 평가하는 경우에도 잔류응력 뿐 아니라 재료적 불균일성이 균열 거동에 영향을 미치기 때문에 시험 결과로부터 균열 거동에 미치는 잔류응력의 영향을 정량적으로 평가하는데 한계가 있다. 따라서, 최근에는 잔류응력이 없는 모재에 크기와 분포가 정확히 제어된 잔류응력을 인위적으로 부가한 모사시편을 이용하여 잔류응력 측정과 균열 거동 평가에 활용하고 있다<sup>7,8)</sup>.

본 논문에서는 원전 1차 계통에서 PWSCC 균열이 발견되고 있는 이종금속 배관 용접부의 잔류응력 분포를 모사하기 위한 시편을 설계하고자 한다. 이를 위해서 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 적절한 분포와 크기의 잔류응력을 갖는 시편 형상과 잔류응력 부가 조건을 결정하였다. 설계에 따라 제작

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jwkim@chosun.ac.kr

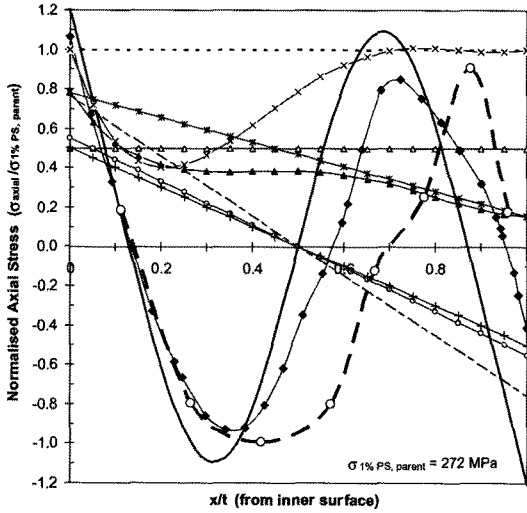


Fig. 1. Axial stress distributions along the thickness in the circumferential weld joint.

된 시편에 잔류응력을 부가하여 잔류 변형률과 잔류응력의 크기를 측정하였다. 측정 결과와 설계시 고려된 잔류 변형률 및 잔류응력을 비교함으로써 모사시편 설계의 적절성을 확인하였다.

## 2. 모사시편의 설계 및 제작

### 2.1. 원주방향 배관 용접부의 축방향 응력분포

본 연구에서는 최근 원전 배관에서 PWSCC가 발생되는 이중금속 원주방향 용접부의 축방향 잔류응력을 모사하기 위한 모사시편을 설계하고자 한다. 이를 위해, 먼저 배관의 원주방향 용접부에서 축방향의 잔류응력 분포를 살펴보았다. Fig. 1은 측정과 해석 결과 그리고 기존의 설계 코드나 평가 절차에서 적용되고 있는 원주방향 용접부의 축방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다<sup>2)</sup>. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 원주방향 배관 용접부에서 측정되거나 해석된 축방향 잔류응력 분포는 내면에서부터 인장-압축-인장-압축의 형태를 보였다. 그러나, 대부분의 설계 코드나 평가 절차는 실제 응력 분포 대신 잔류응력 분포를 선형으로 가정하여 적용하고 있는 것을 알 수 있다.

### 2.2. 잔류응력 생성 방법

기존의 연구 결과에 의하면, 일반적으로 시편에 기계적 하중 또는 열 하중을 작용시켜 모재 시편에 인위적인 잔류응력을 부가한다<sup>9)</sup>. 기계적 하중을 작용시키는 경우는 대부분 노치가 가공된 시편에 인

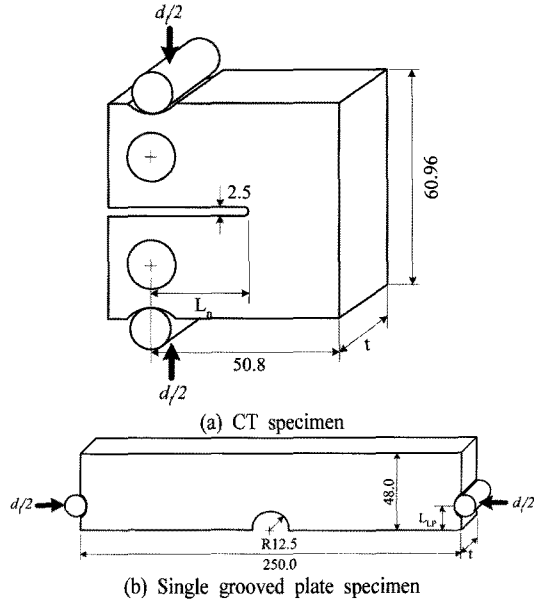
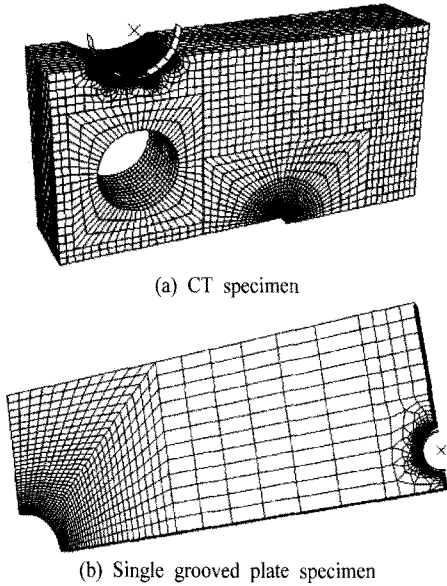


Fig. 2. Candidate specimens for residual stress simulation.

장 또는 압축하중을 가하여 노치 잔여면에 잔류응력을 생성시킨다. 열 하중을 가하는 경우에는 일정 온도 이상으로 시편을 가열한 후 시편의 일부 영역을 급냉하거나 시편을 구속한 상태에서 일부분을 가열하거나 용접하여 잔류응력을 생성시킨다. 이들 방법 중 Fig. 2에 나타난 것과 같이 CT 시편의 하중선을 따라 압축하중을 가하거나 측면 홈 (Grooved) 이 존재하는 판상 시편에 압축하중을 가할 때, 노치 잔여면에서 잔류응력의 분포가 원주방향 배관 용접부의 축방향 잔류응력 분포(내면에서부터 인장-압축-인장)와 유사한 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>. 또한, 이들 시편 형상은 파괴나 피로균열진전 시험에 직접 사용될 수 있기 때문에 원하는 크기의 잔류응력 생성 후 추가 가공 없이 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이들 두 종류의 모사시편을 대상으로 상세 유한요소해석을 수행하고, 최종적으로 시편의 형상과 잔류응력 생성 방법을 결정하였다.

### 2.3. 유한요소해석을 통한 모사시편 설계

앞서 선정된 CT 시편과 Grooved 판상 시편을 대상으로 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 유한요소 해석은 Fig. 2의 시편 형상과 하중작용 방법을 기초로 노치 길이( $L_n$ ), 시편 두께( $t$ ), 하중 작용 위치( $L_L$ ), 압축 하중의 크기( $d_L$ ) 등 다양한 변수들을 고려하여 수행되었다. Fig. 3은 해석에 사용된 유



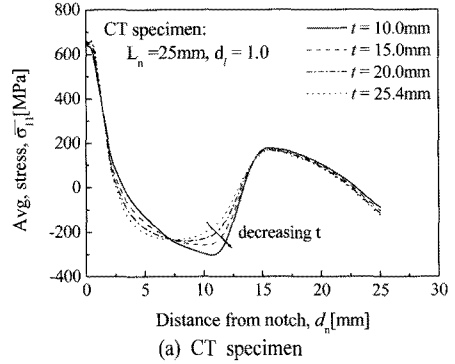
(a) CT specimen

(b) Single grooved plate specimen

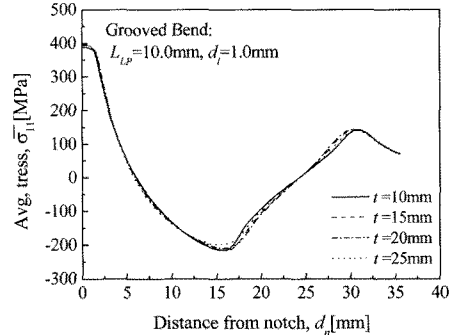
Fig. 3. Finite element model for residual stress simulation.

한요소 모델을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 20절점의 Solid 요소를 적용한 3차원 모델로 형상과 작용하중의 대칭성을 고려하여 시편의 1/4만 모델링 하였다. 모델에서 하중이 작용되는 편은 강체로 가정하였으며, 시편의 재료물성치는 항복응력이 290MPa, 영률이 195GPa, 그리고 포아송 비가 0.29인 것으로 가정하였다. 해석은 하중이 가해지는 단계와 하중이 제거되는 2단계로 수행되었으며, 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS Code가 사용되었다<sup>10)</sup>.

해석 결과, 두 시편 모두 노치 길이, 하중 위치, 시편 두께, 그리고 하중 크기에 관계없이 노치 선단에서부터 인장-압축-인장 형태의 잔류응력 분포를 보였다. 따라서, 기존 연구에서 알려진 바와 같이 이들 두 시편은 원주방향 배관 용접부의 축방향 잔류응력 분포를 적절히 모사하는 것으로 확인되었다. 다만, Fig. 4에 나타낸 것과 같이 CT 시편에서는 Grooved 평판 시편에 비해 시편 두께에 따른 잔류응력의 분포가 큰 차이를 보였다. 또한, 시편의 두께 방향으로 중심부와 표면부에서 잔류응력의 크기와 분포가 크게 변화하였다(Fig. 5). Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 CT 시편에서 중심부와 표면부의 잔류응력 분포 차이는 노치 길이가 길고 시편 두께가 증가할수록 더욱 뚜렷하였다. 이러한 차이는 CT 시편이 Grooved 평판 시편에 비해 노치 선단에서 응력의 집중이 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 잔류응력이 부가된 모

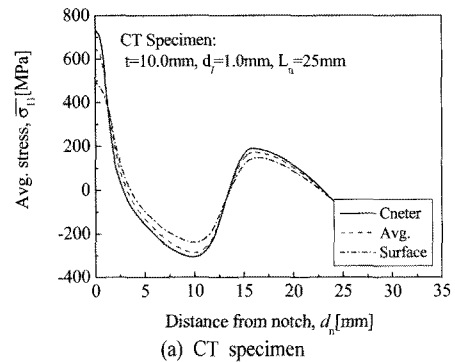


(a) CT specimen

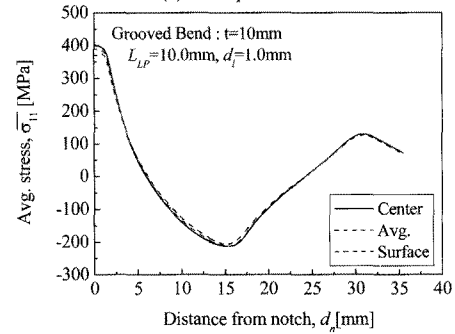


(b) Single grooved plate specimen

Fig. 4. Effect of specimen thickness on the distributions of residual stress.



(a) CT specimen



(b) Single grooved plate specimen

Fig. 5. Difference of residual stress distributions in the different thickness location.

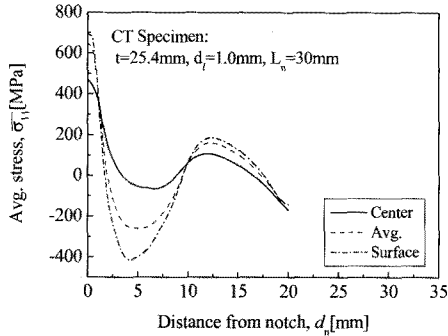
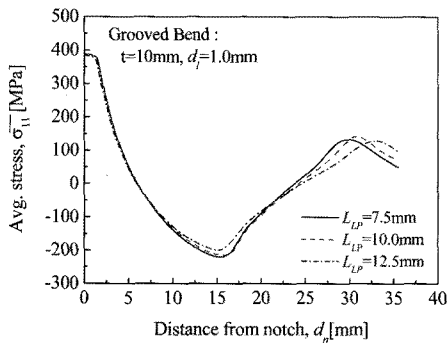
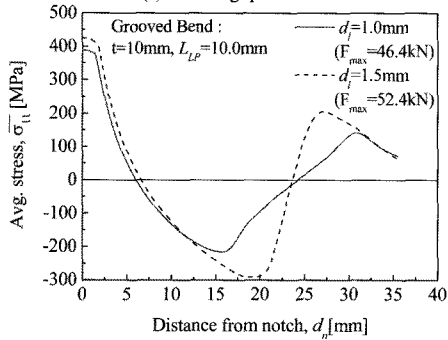


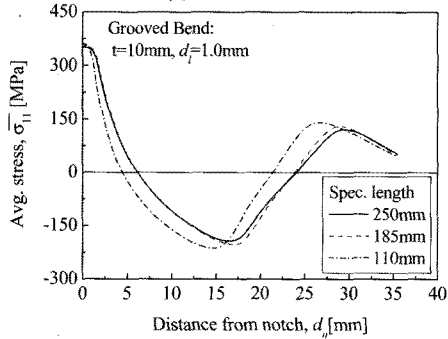
Fig. 6. Residual stress distributions at center and surface for thicker specimen.



(a) Loading position



(b) Load level



(c) Length of specimen

Fig. 7. Effects of loading position, loading level, and length of specimen on the residual stress.

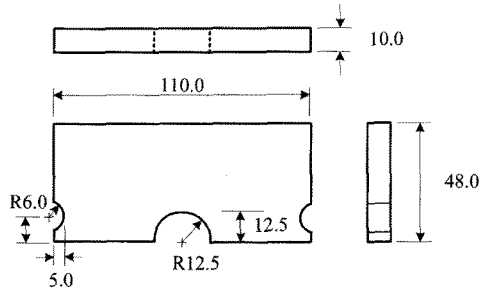


Fig. 8. Dimensions of specimen for residual stress simulation.

사시편을 잔류응력의 측정과 균열진전 시험에 활용하고자 한다. 따라서, 잔류응력이 측정되는 시편의 표면과 균열이 진전하는 중심부 사이에 잔류응력의 차이가 크게 나타나는 것은 모사시편의 활용 목적상 바람직하지 않으므로, Grooved 평판 시편을 잔류응력 모사를 위한 시편으로 결정하였다.

따라서, Grooved 평판 시편을 대상으로 하중작용 위치, 하중 크기, 시편 두께, 시편 길이 등에 대한 변수 해석 결과를 바탕으로 시편의 최종 형상과 작용하중의 크기를 결정하였다. Fig. 7에 나타낸 것과 같이 하중 작용위치가 기준 위치에서  $\pm 25\%$  범위에서 변할지라도 잔류응력의 분포와 크기에는 큰 차이가 없었다. 그러나, 작용하중이 증가하는 경우에는 전체적으로 잔류응력의 크기가 증가하였으며, 특히 노치선단에 비해 시편의 중심부에서 발생하는 압축응력과 인장응력의 크기가 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다. 일정한 조건에서 Grooved 평판 시편의 길이가 250mm에서 185mm로 감소하는 경우에는 잔류응력의 분포와 크기가 거의 변화하지 않았으며, 110mm로 감소하는 경우에도 잔류응력의 크기는 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 이들 결과를 바탕으로 Fig. 8의 시편 형상을 결정하였다.

### 3. 모사시편 설계의 검증

#### 3.1. 잔류응력 부가

Fig. 8에 따라 가공된 시편에 잔류응력을 부가하기 위해, 시편 양단에 압축하중을 작용시켰다. 시편 재료로는 TP316L 스테인리스강과 SA508 Gr.3 저합금강이 각각 사용되었으며, Fig. 9는 인장시험기를 이용하여 모사시편에 압축하중을 부가하는 장면을 보여주고 있다. 시편에 가해지는 압축하중의 크기는 Grooved 중심에서 측정된 축방향 변형률이 유한요소해석 결과에서 1.0mm의 압축 변위가 시

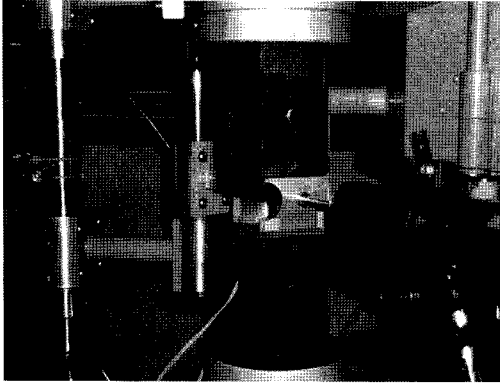


Fig. 9. Photograph of setup for applying residual stress to the grooved specimen.

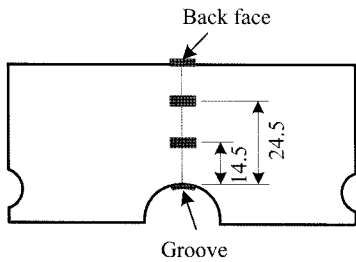


Fig. 10. Strain measurement locations at the simulated specimen.

편에 가해질 때의 축방향 변형률과 일치하는 하중의 크기로 결정하였다. 유한요소해석에는 실제 시험에 사용된 재료의 인장물성치가 입력으로 사용되었다. 압축하중 작용시 시편에 작용되는 변형률을 측정하기 위해서, Groove 중심, 시편의 측면(Groove로부터 14.5mm와 24.5mm 위치), 그리고 Groove 뒷면에 변형률 게이지를 축방향으로 부착하여 하중이 작용되는 동안과 하중 제거 후 축방향 변형률을 측정하였다(Fig. 10). 해석 결과 1mm의 압축 변위가 시편에 가해질 때, Groove 중심에서 축방향 변형률은 SA508 Gr.3의 경우에 -1.993%, TP316L의 경우에 -1.926%로 계산되었다. 실험적으로 측정된 하중과 변형률 데이터로부터 이들 변형률에 해당하는 하중을 살펴보면, SA508 Gr.3의 경우는 6,300 kgf이고 TP316L의 경우는 3,650kgf가 된다. 따라서, 이들 하중을 각각의 시편에 작용시켜 잔류응력을 생성시켰다. 시험에는 각 재료별로 3개의 시편이 사용되었으며, 모든 시편에서 위치별 변형률 데이터를 측정하였다.

압축하중 작용시 좌굴 발생으로 인해 시편에 비대칭적인 하중이 작용될 수 있으므로, 시편의 측면에 LVDT를 설치하여 측면 방향으로의 힘 정도를

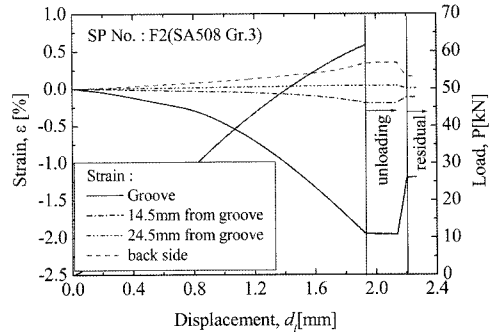


Fig. 11. Load and strains measured during loading and unloading.

측정하였다. 측정 결과 하중이 작용되는 동안 최대 힘 변위는 0.32mm이고, 하중 제거 후 잔류 변위는 0.135mm였다. 따라서, 시편의 두께가 10mm이고 길이가 110mm인 것을 고려하면 좌굴에 의한 시편의 변형은 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있다. Fig. 11은 압축하중이 작용되는 동안 측정된 하중과 각 위치에서의 변형률 측정 결과를 나타낸 것이다.

### 3.2. 잔류응력 검증

모재에 잔류응력을 생성시킨 모사시편이 설계시 고려된 잔류응력의 분포와 크기를 갖는지 확인하기 위해서, 시편의 각 위치에서 측정된 잔류 변형률과 유한요소해석 결과에서 주어진 잔류 변형률의 크기를 비교하였다. Fig. 12는 각 위치에서 비교 결과를 나타낸 것이다. SA508 Gr.3 시편의 경우에는 Groove 중심과 시편 뒷면에서 측정된 변형률이 해석 결과보다 약간 높은 값을 보였으나, 시편의 측면에서 측정된 변형률은 해석 결과와 거의 일치하였다. TP316L 스테인리스 시편의 경우에도 Groove 중심과 뒷면에서 측정된 결과는 해석 결과보다 약간 낮거나 높은 결과를 보였으나, 측면에서 측정된 결과는 해석 결과와 거의 일치하였다. 따라서, Groove 중심과 뒷면에서 측정된 변형률이 해석 결과와 약간의 차이를 보이지만, 이 정도의 오차는 변형률 측정에서 무시할 수 있는 정도이므로 측정 결과와 해석 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

한편, X-ray 회절법을 이용하여 잔류응력이 부가된 시편의 노치 잔여면을 따라 시편의 양쪽 면에서 잔류응력을 측정하였다. Fig. 13은 측정된 축방향 잔류응력을 노치선단에서부터 위치에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 SA508 Gr.3의 경우, 측정된 잔류응력이 설계시 고려된 유한요소 해석 결과와 비교하여 약간 낮은 값을 보

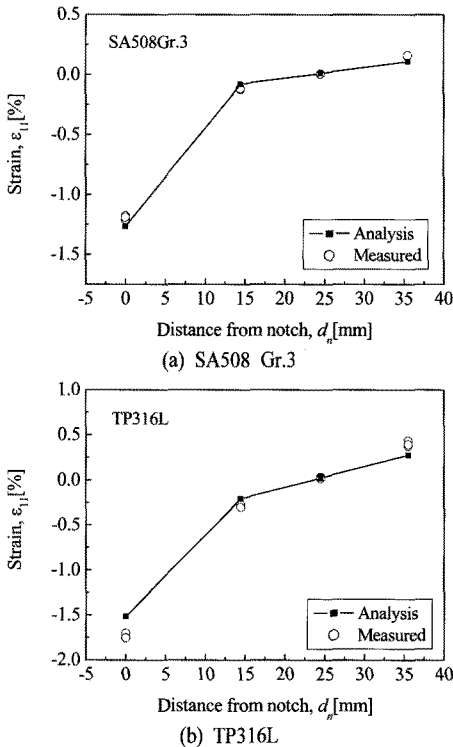


Fig. 12. Comparison of residual strains measured and given by finite element simulation.

였으나 전체적인 잔류응력 분포가 잘 일치하였다. 반면, TP316L 스테인리스강의 경우에는 노치 잔여 면에서 위치에 따른 전체적인 잔류응력의 변화 경향은 해석 결과와 유사한 것으로 생각할 수 있으나, 측정 결과에서 데이터의 편차가 너무 크기 때문에 정량적인 비교는 어렵다. SA508 Gr.3에 비해 TP316L 스테인리스강에서 잔류응력 측정 결과가 큰 편차를 보이는 것은 TP316L 스테인리스강의 큰 결정립에 기인하는 것으로 판단된다. X-ray 회절법을 이용한 잔류응력 측정이 표면에서 수십  $\mu\text{m}$  범위에서 이루어지므로, 결정립이 수십  $\mu\text{m}$  이상인 경우에는 데이터의 편차가 심하고 측정된 잔류응력의 신뢰성이 낮은 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>. 따라서, TP316L 스테인리스강에서 해석 결과와 측정 결과의 불일치는 X-ray 회절법을 이용한 잔류응력 기법의 한계로 모사시편에 생성된 잔류응력에 문제가 있는 것은 아닌 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서 제시한 시편 형상과 잔류응력 부가 방법을 이용하여 적절한 형태의 분포와 크기의 잔류응력을 갖는 모사시편을 만들 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

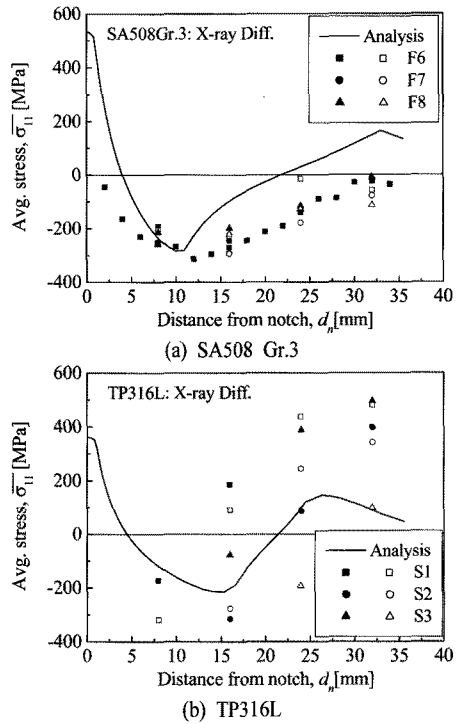


Fig. 13. Comparisons of residual stresses measured and simulated by finite element.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원주방향 배관 용접부의 축방향 잔류응력 분포를 모사하기 위한 실험실 규모의 시편 형상과 잔류응력 부가 방법을 제시하였다. 제안된 방법에 따라 잔류응력이 부가된 모사시편에서 측정된 잔류 변형률과 잔류응력을 설계시 고려된 유한요소 해석 결과와 비교한 결과, 측정 결과가 설계시 고려된 해석 결과와 비교적 잘 일치하였다. 따라서, 제안된 시편 형상과 하중 작용 방법으로 잔류응력을 생성시킨 모사시편은 잔류응력 측정과 잔류응력 조건에서 균열 거동 평가에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 기초전력연구원 (R-2007-2-066) 주관의 수행된 전력선행기술 과제의 결과임.

#### 참고문헌

- 1) USNRC, Information Notice 2000-17, "Crack in weld area of reactor coolant system hot leg piping at V.C. summer", Oct. 18, 2000.
- 2) F. W. Brust and P. M. Scott, "Weld residual stresses

- and primary water stress corrosion cracking in bimetal nuclear pipe welds”, Proc. of PVP-2007, PVP 2007-26297, 2007.
- 3) P. J. Bouchard, “Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds”, Int. J. Pres. Ves. Piping, Vol. 84, pp. 195 ~ 222, 2007.
  - 4) S. K. Bate, A. P. Warren, C. T. Watson, P. Hurrell, and J. A. Francis, “UK research programme on residual stresses: progress to date”, Proc. of PVP-2007, PVP 2007-26337, 2007.
  - 5) D. Deng, H. Murakawa, and W. Liang, “Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe”, Comp. Mat. Scie., Vol. 42, pp. 234 ~ 244, 2008.
  - 6) J. Devaux, G. Mottet, J-M. Bergheau, S. K. Bhandari, and C. Faigy, “Evaluation of the integrity of PWR bimetallic welds”, J. Pres. Ves. Tech., Vol. 122, pp. 368 ~ 373, 2000.
  - 7) A. J. Price and M. R. Wenman, “Modeling fatigue crack growth in a residual stress field”, Proc. of PVP2006-ICPVT-11-93174, 2006.
  - 8) A. H. Sherry, M. R. Goldthorpe, J. Fonseca, and K. Taylor, “Residual stress effects on ductile tearing”, Proc. of PVP-2006, PVP2006-ICPVT-11-93677, 2006.
  - 9) A-H. Mahmoudi, C. Aird, C. E. Truman, D. J. Smith, “Generating well defined residual stresses in laboratory specimens”, Proc. of PVP-2006, PVP2006-ICPVT-11-93620, 2006.
  - 10) ABAQUS Users manual, version 6.5, Hibbitt, Karlson & Sorensen, 2005.
  - 11) J. Lu, Handbook of Measurement of Residual Stresses, 1996, SEM, The Fairmont Press. Inc.