

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.413

매설 가스 배관 이종금속 용접부의 강도 불일치가 잔류응력에 미치는 영향 고찰[§]

김종성^{*†} · 김우식^{**} · 백종현^{**}
* 순천대학교 기계공학과, ** 한국가스공사

Investigation on the Effect of Strength Mismatch on Residual Stresses in Welds with Different Strength Used in Buried Natural Gas Pipeline

Jong Sung Kim^{*†}, Woo Sik Kim^{**} and Jong Hyun Baek^{**}

* Dept. of Mechanical Engineering, Sunchon Nat'l Univ.,

** Korea Gas Corporation

(Received August 25, 2009 ; Revised February 9, 2010 ; Accepted February 11, 2010)

Key Words: Residual Stress(잔류응력), Buried Natural Gas Piping(매설 천연가스 배관), Finite Element Method(유한요소법), Strength Mismatch(강도 불일치), Dissimilar Weld(이종 금속 용접부)

초록: 본 연구에서는 실제 용접 과정을 모사하는 유한요소 해석을 이용하여 강도 불일치를 가지는 매설 천연가스 배관 용접부의 잔류응력 분포를 계산한다. 유한요소 해석 절차의 타당성을 검증하기 위해 온도 및 잔류응력 해석 결과들은 실제 용융부 형상과 API 579 적용 결과와 비교된다. 기계적 강도 차이, 용접 금속의 강도, 덧살 및 입열량 등과 같은 용접 및 재료 변수들이 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가하기 위해 Parametric Study가 수행된다. 최종적으로 Parametric Study 결과에 근거하여 용접 및 재료 변수들의 영향이 고찰된다. 특히, 모재들 사이의 강도 불일치는 잔류응력 분포에 미미한 영향을 미침을 확인하였다.

Abstract: In this study, residual-stress distributions in welds with different strength used in natural gas pipelines are calculated by using finite-element analysis and simulating a realistic welding process. The temperature and residual-stress analysis results are compared with the real fusion profile and the application results of the Fitness-For-Service assessment code, API 579 in order to validate the finite-element analysis model and procedure. Parametric study is performed to assess the effect of welding and material variables such as mechanical strength mismatch, the strength of weld metal, reinforcement, and heat input on the residual stress distributions. Finally, on the basis of the parametric study results, the effects of these variables on residual stress distributions are investigated. In particular, the strength mismatch between base metals has an insignificant effect on residual-stress distributions.

1. 서론

천연가스는 폭발성 유체로 천연가스 매설 배관이 파손시 심각한 인적/물적 손해를 야기할 수 있으며 실제 매설 배관의 파손으로 상당한 인명 피해가 발생한 사례⁽¹⁾가 보고되고 있다. 따라서 천연가스 매설 배관의 대표적 취약부인 배관 용접부의 건전성을 신뢰성있게 평가하는 것이 중요하다. 용접부에는 국부적인 급가열과 급냉각으로

인해 용접 잔류응력이 발생하게 되는데 이러한 잔류응력은 용접부에 응력부식균열 또는 피로균열을 발생 또는 성장을 촉진하여 용접부의 건전성을 저해할 수 있다. 용접부의 잔류응력을 신뢰성있게 평가하는 것은 천연가스 배관의 건전성이 확보된 설계 및 유지 관리 측면에서 중요하다. 따라서 국내외적으로 사용자적합성(FFS : fitness-for-service) 평가 측면에서 용접 잔류응력과 관련된 다양한 연구들⁽²⁻⁵⁾이 진행되었다.

최근 들어 비용 절감을 위해 천연가스 공급 주 배관을 기존 배관 보다 기계적 강도가 높은 재질로 상향 시공하는 추세로서 모재들의 기계적 강

§ 이 논문은 2009년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kimjbsat@sunchon.ac.kr

력해석이므로 잔류응력에 미치는 푸아송 비의 효과는 다른 물성들이 미치는 영향에 비해 상대적으로 미미하기 때문에 온도에 무관하게 일정한 값인 0.29로 설정하였다. Figure 2~8은 온도에 따른 열적/물리적 물성치와 기계적 물성치 변화를 보여주고 있다. 여기서 X42-X70 용접부에 사용되는 용접금속과 X65-X70 용접부에 사용되는 용접금속은 동일한 재질이다. Bi-linear isotropic 소성 경화거동을 사용하였다.

용접의 경우, 그루브 부위는 용접금속의 용착 동안에는 단열상태이고 용착 후에는 자연대류인 상태로 가정한다. 한편 용접금속은 액상선 온도

보다 높은 1500℃ 정도의 높은 온도로 용착된다고 가정한다. 초기 예열을 고려하였으며 용착시 입열량은 용접시방서 상의 전압, 전류 값들을 이용하여 고려하였다. 각 패스별 평균 용접속도로 용접된다고 가정하였다.

누설시험 동안에는 상온으로 유지한다고 가정하였다. 정상운전 중에는 -1℃ 온도까지 냉각 유지된다.

용접, 누설시험 및 정상운전 중 기존 배관 (API 5L Gr.X65) 끝단의 절점들은 절단면에 수직인 방향에 대해서만 구속하였다. 용접 동안에는 어떠한 하중도 작용하지 않는 반면, 누설시험과 정상운전 중에는 내압이 각각 7.84MPa과 6.86MPa

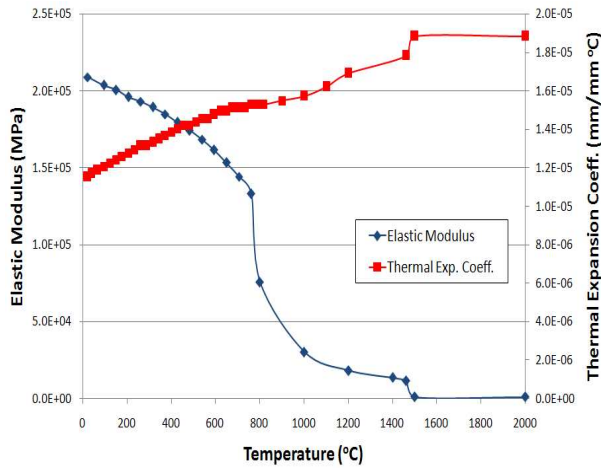


Fig. 3 Variations of elastic modulus & thermal expansion coefficient vs. temperature

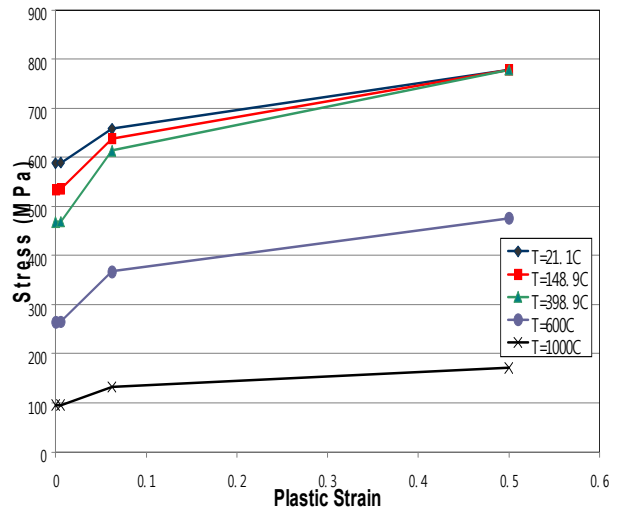


Fig. 5 Plastic behavior of X70 vs. temperature

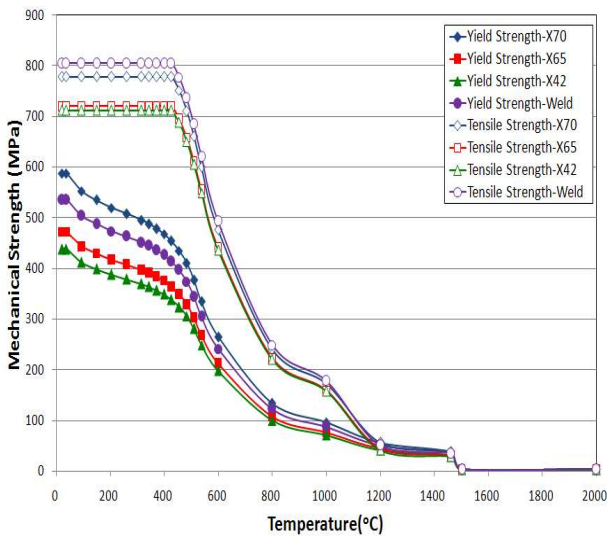


Fig. 4 Variations of mechanical strengths vs. temperature

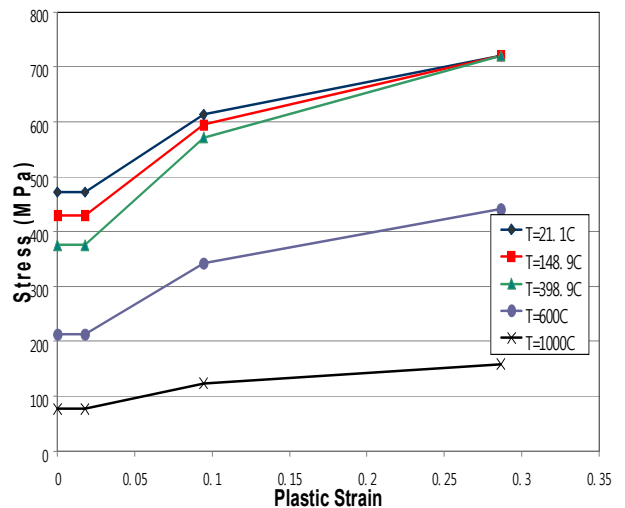


Fig. 6 Plastic behavior of X65 vs. temperature

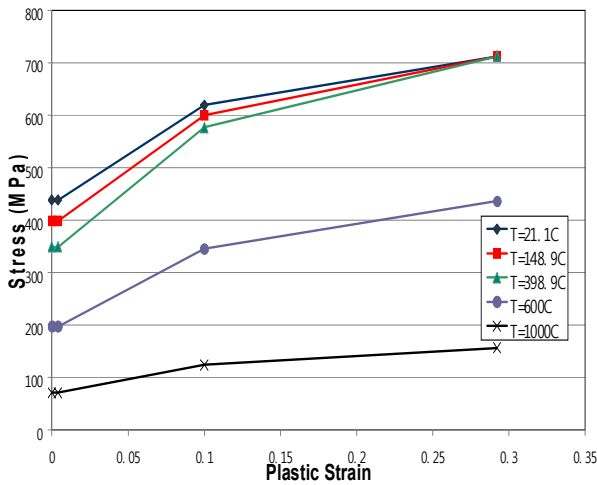


Fig. 7 Plastic behavior of X42 vs. temperature

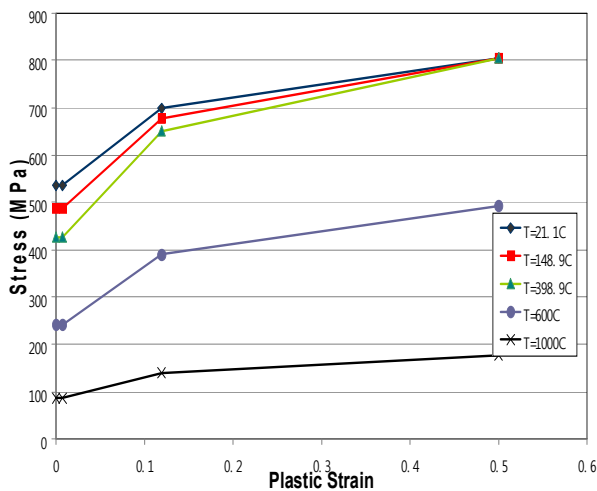
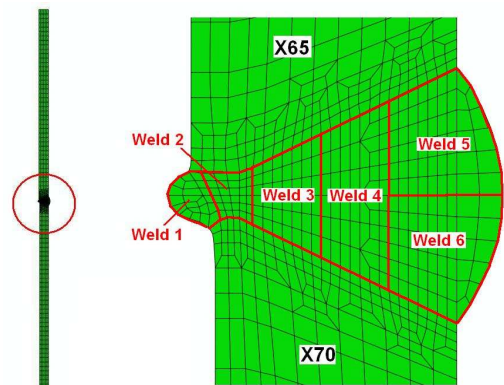


Fig. 8 Plastic behavior of weld metal vs. temperature

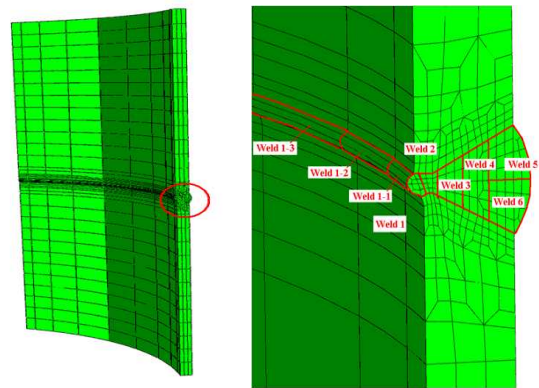
이 작용하며 배관 끝단에 end-cap 압력이 작용한다.

2.2 유한요소 모델링

Figure 9는 온도 및 잔류응력 해석을 위해 상용 프로그램인 PATRAN⁽⁹⁾을 이용하여 모델링한 2차원 축대칭 및 3차원 유한요소 모델이다. 변수 해석을 위해 사용되는 2차원 축대칭 유한요소 모델의 요소특성은 8절점 요소이며 총 요소수와 절점수는 각각 1079개와 3468개이다. 용접부는 좀더 세밀하게 유한요소 모델링을 수행하였다. 용접 절차 사양서에 따라 용접패스는 6패스로 설정하였다. 유한요소 해석 절차의 타당성 검증을 위해 사용되는 3차원 유한요소 모델의 요소특성은 20절점 요소이며 총 요소수와 절점수는 각각 4905

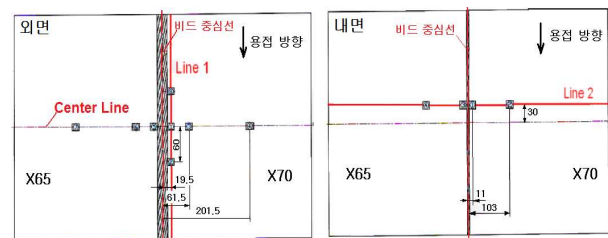


(a) 2-dimensional axisymmetric model



(b) 3-dimensional model

Fig. 9 Finite element models of girth weld on natural gas piping



(a) Outer surface

(b) Inner surface

Fig. 10 Strain gauge positions

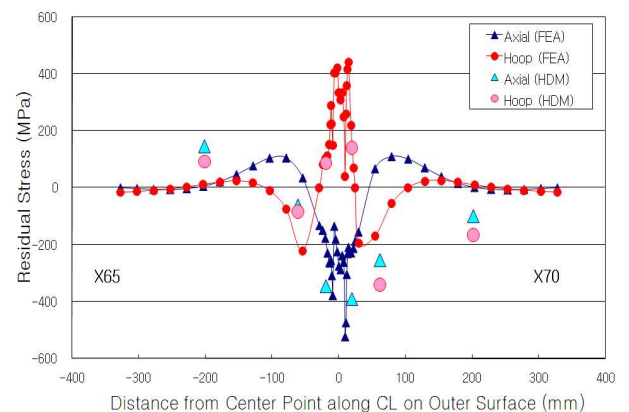


Fig. 11 Comparison of residual stress distributions along welding centerline on outer surface

개와 13674개이다. 그림에서 보이는 바와 같이 용접패스는 두께 방향으로 6개, 원주방향으로 9개로 설정하였다.

2.3 유한요소 해석절차의 타당성 검증

상용 FEA 소프트웨어인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하여 온도 및 응력 해석을 수행하였다. 열전도 근거 온도해석을 수행하였으며 Bi-Linear Isotropic 소성 경화 거동을 따르는 탄소성 응력해석을 수행하였다. 유한요소 해석 모델과 절차의 타당성 검증을 위한 비교치로 활용될 잔류응력 측정치는 천공법을 이용하여 도출하였다. 변형률 게이지 (MGAK-1)를 설치하고 천공법 측정 장비 (RS-200)를 이용하여 표면으로부터 1.2 mm 깊이의 잔류응력을 측정하였다. Figure 10은 변형률 게이지 설치 위치를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 외면에 8개, 내면에 4개를 설치하였다.

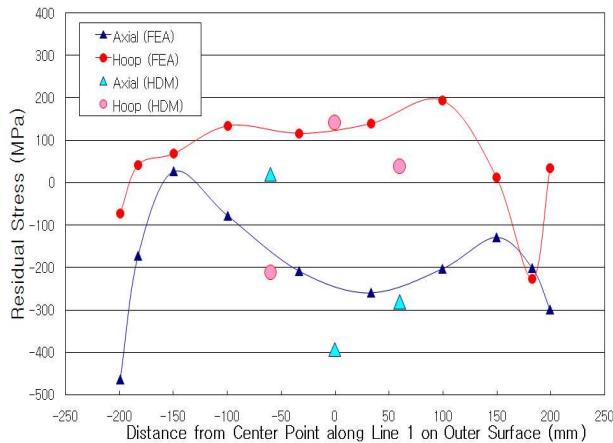


Fig. 12 Comparison of residual stress distributions along line 1 on outer surface

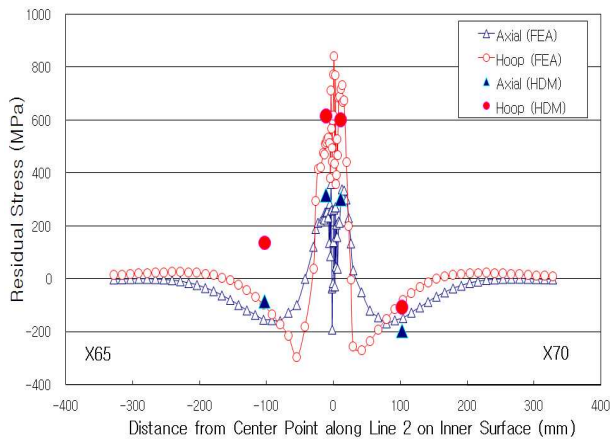


Fig. 13 Comparison of residual stress distributions along line 2 on inner surface

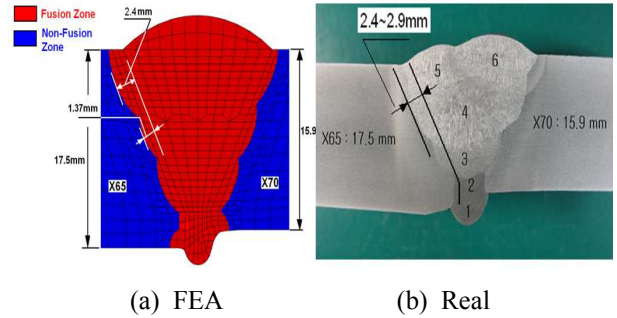


Fig. 14 Comparison of fusion zone profile

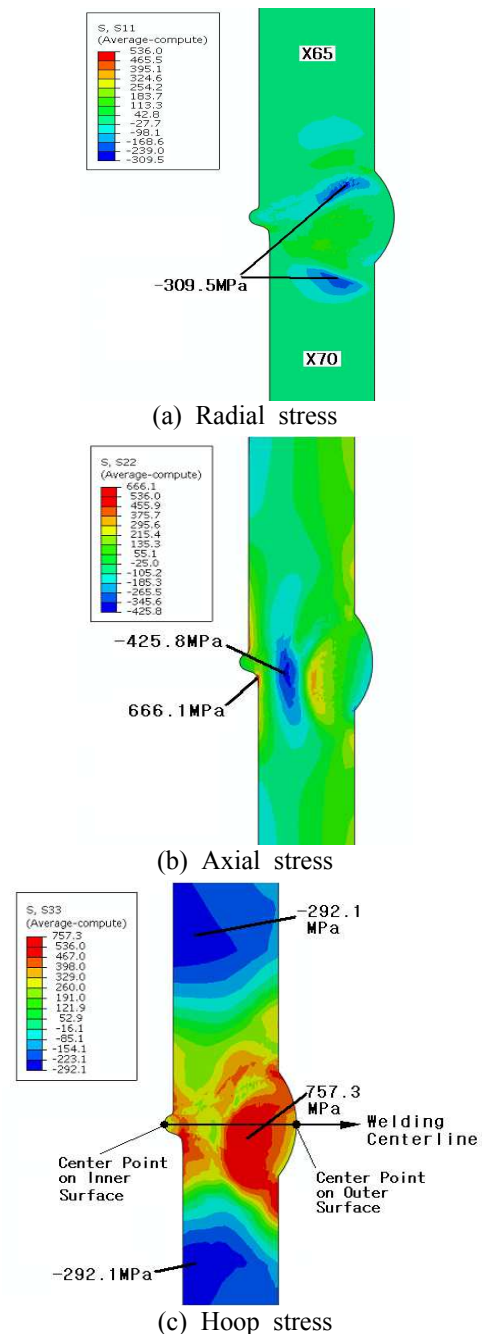


Fig. 15 As-welded residual stress distributions

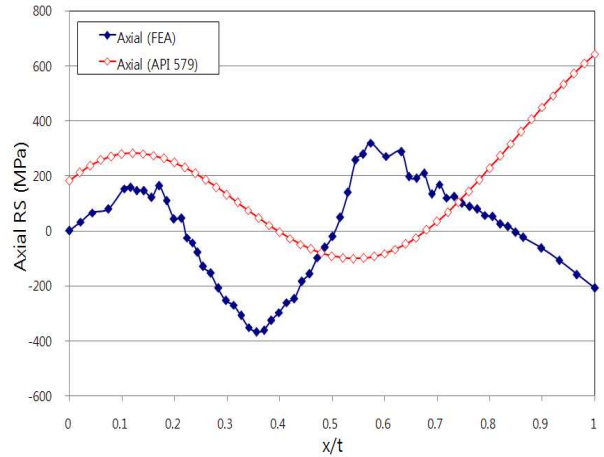
Figure 11은 외면 용접부 중앙선을 따른 잔류응력 분포를 비교한 것이다. Figure 12는 외면 Line 1을 따른 잔류응력 분포를 비교 제시하고 있다. Figure 13은 내면 Line 2를 따른 잔류응력 분포를 비교한 것이다. 여기서 Line 1과 Line 2는 Figure 11에 나타내고 있다. Figure 11~13에서 보이는 바와 같이 일부 정량적인 값에 차이가 있으나 천공법에 의한 측정 결과와 유한요소 해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 잔류응력 해석 절차가 타당하다고 판단된다.

2.4 잔류응력 해석

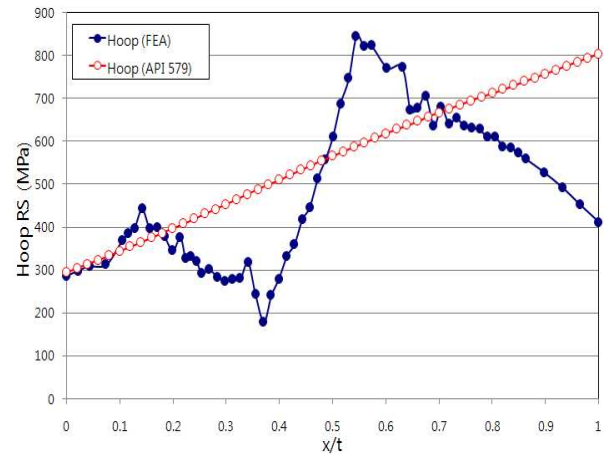
Figure 14는 열전도 근거 온도해석을 통해 도출한 용융부 형상과 실제 용융부 형상을 비교한 그림이다. 용융부 형상 및 크기는 FFS 평가 측면에서 개발한 유한요소 잔류응력 해석절차⁽²⁾에 따르면 온도 해석의 타당성을 평가하는 가장 중요한 변수이다. 그림에서 보이는 바와 같이 유한요소 온도해석을 통해 도출한 용융부 형상 및 크기가 실제와 거의 일치하므로 본 연구에서 수행한 열전도 근거 온도 해석 절차와 결과는 타당함을 알 수 있다.

Figure 15는 as-welded 용접 잔류응력 분포를 보여주고 있다. Figure 15에서 보이는 바와 같이 반경방향 잔류응력은 상대적으로 낮은 값을 보이는 반면 원환 잔류응력은 상대적으로 높은 값을 보임을 알 수 있다.

본 연구는 매설 천연가스 배관 용접부의 FFS 평가시 고려하여야만 하는 잔류응력에 미치는 강도불일치의 영향을 고찰하는 연구이므로 잔류응력 분포식이 유일하게 제시된 비원자력계 FFS 평가 코드인 API 579의 적용 결과와의 비교가 필요하다. Figure 16은 유한요소 잔류응력 해석 결과를 API 579 적용 결과와 비교 제시한 것이다. 여기서 x는 용접 중앙선을 따른 내표면 중앙점으로부터의 거리이며 t는 용접 중앙선의 두께이다. 유한요소 해석 결과가 API 적용 결과 보다 전반적으로 큰 인장응력을 보이므로 실제 현상을 모사한 본 해석은 보수성이 내포된 FFS 평가 코드인 API 579 보다 덜 보수적인 결과를 도출한다. 참고로 API 579의 잔류응력 분포식은 유한요소 해석 및 다양한 측정방법의 적용을 통해 도출한 잔류응력 분포들을 입력 데이터베이스로 사용하여 균열 성장 구동력을 크게 유발하는 보다 큰 인장응력이 계산되도록 개발된 것이다. 균열 존재시 균열 성장 구동력을 유발하는 잔류응력 분포 양상 측면



(a) Axial stresses



(b) Hoop stresses

Fig. 16 Comparison of as-welded residual stress distributions along welding centerline between the present results and the API 579 application results

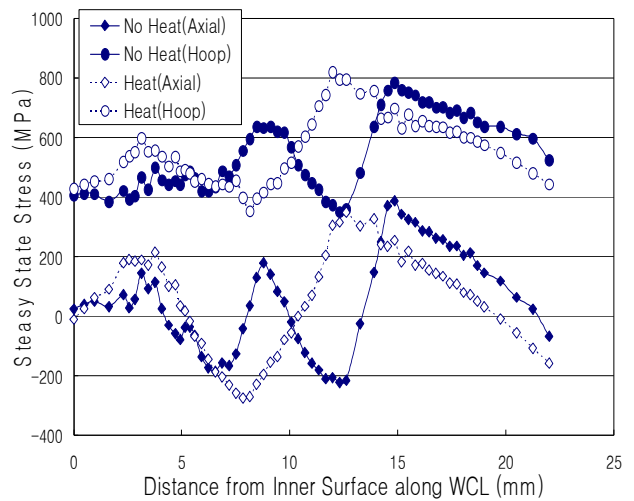


Fig. 17 Variation of steady state stress distributions along welding centerline vs. heat input

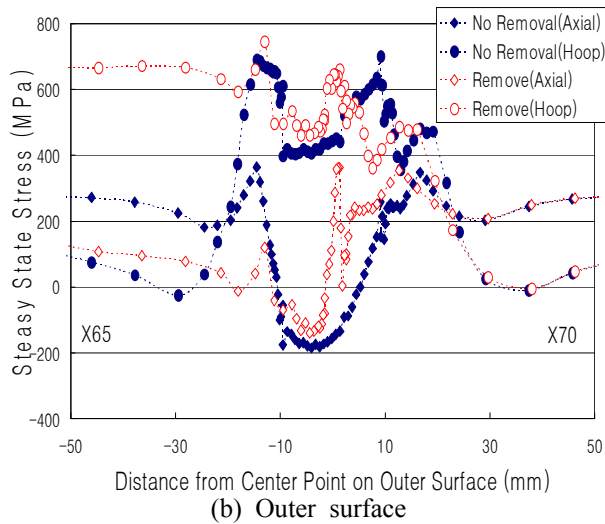
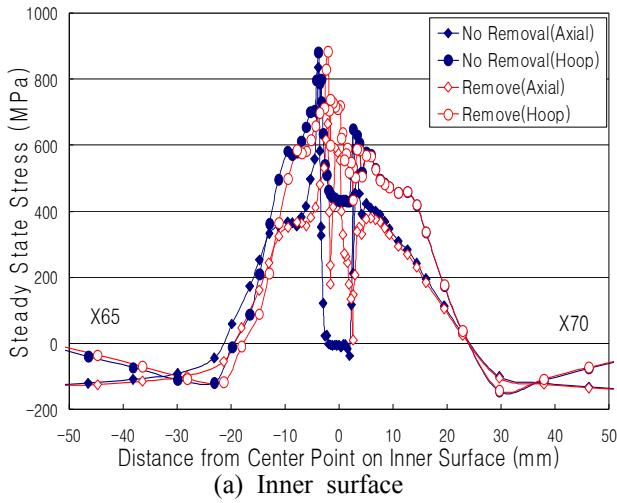


Fig. 18 Variation of steady state stress distributions on inner/outer surfaces vs. removal of reinforcement

에서 아래와 같이 합리적으로 일치하므로 본 연구에서 수행한 잔류응력 해석 절차 및 결과는 타당함을 알 수 있다. 여기서 굽힘 형태는 균열의 지속적인 성장과 최종적인 파단을 야기시키는 반면 자기평형 형태는 균열이 성장하다가 정지하거나 또는 성장하더라도 느린 성장을 야기시킨다.⁽²⁾

- 두가지 결과 모두, 축방향 응력 경우 내면 쪽에서 인장, 중앙부에서 압축, 외면쪽에서 다시 인장이 발생하는 자기평형 (self-equilibrium) 잔류응력 분포 형태⁽²⁾를 보임
- 두가지 결과 모두, 원환 응력 경우 내외면, 중앙부 모두 인장응력이며 외면쪽으로 갈수록 증가하는 굽힘 잔류응력 분포 형태⁽²⁾를 보임

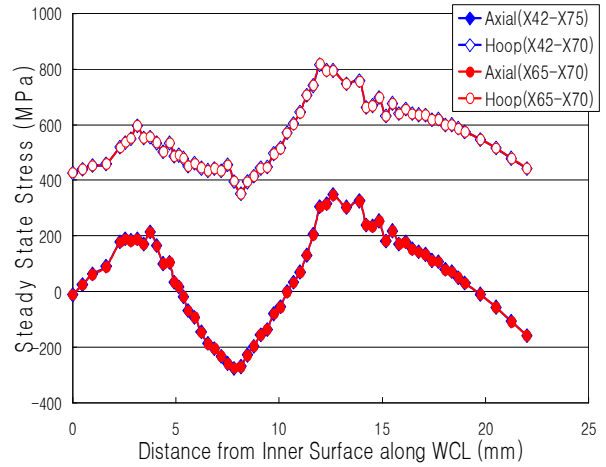


Fig. 19 Variation of steady state stress distributions along welding centerline vs. strength mis-match between base metals

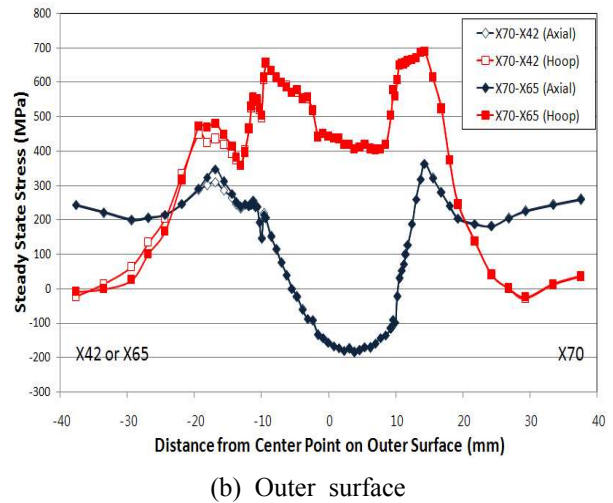
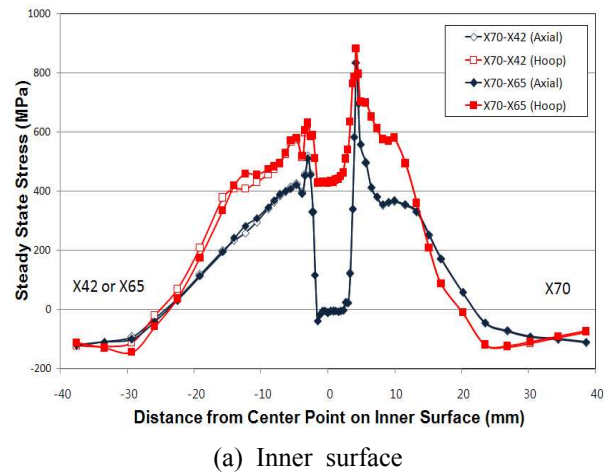


Fig. 20 Variation of steady state stress distributions along inner/outer surfaces vs. strength mis-match between base metals

3. 변수 해석 및 영향 고찰

3.1 용접 변수의 영향

Figure 17은 정상운전 동안 정상상태에서의 응력분포의 변화를 입열량 고려에 따라 제시하고 있다. 여기서 No Heat는 액상선의 온도로 용접금속이 용착되고 입열 없이 바로 냉각됨을 의미한다. 정상상태에서의 응력분포는 잔류응력 해석에 연이어 누설시험 및 반복적인 정상운전 탄소성 응력해석을 수행하여 도출한 용접 중앙선을 따른 응력분포이다. Figure 17에서 보이는 바와 같이 국부적인 차이는 있으나 균열 구동력을 유발하는 잔류응력 분포 양상 측면에서 유사한 분포를 보여 주고 있다. 즉, 입열량은 정상상태 응력분포에 큰 영향을 미치지 않는다.

Figure 18은 덧살 제거 여부에 따른 내외 표면의 정상상태 응력분포 변화를 보여주고 있다. 덧살 제거는 덧살에 해당하는 유한요소의 제거를 통해 모사하였다. 덧살 제거시 내면의 최대 축방향 응력값은 증가하며 외면의 응력분포는 상당히 변화함을 알 수 있다. 또한, 덧살 제거시 기계적 강도가 낮은 기존 강 (API 5L Gr.X65) 배관의 외면 쪽 축방향 응력은 감소하는 반면 원환 응력은 증가하는 경향을 보인다.

3.2 재료 변수의 영향

Figure 19는 모재 간 강도 불일치에 따른 용접 중앙선 상의 정상상태 응력분포 변화를 나타내고 있다. Figure 20은 내외면에 따른 정상상태 응력분포를 강도 불일치 정도에 따라 비교 제시하고 있다. Figure 19, 20으로부터 모재 간 강도 불일치는 정상상태 응력 분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 Figure 21에 제시된 바와 같이 X65-X70 용접부의 항복영역과 X42-X70의 항복영역을 비교시 미미한 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 여기서 HT와 NOP는 각각 수압시험과 정상운전을 의미한다.

Figure 22는 용접금속의 항복강도 변화에 따른 용접 중앙선 상의 정상상태 응력분포 변화를 나타내고 있다. Figure 22에서 보이는 바와 같이 용접금속의 항복강도 증가시 외면 쪽의 원환응력은 상당히 증가하는 반면 다른 부위 또는 다른 성분의 응력은 미미한 증가를 보인다.

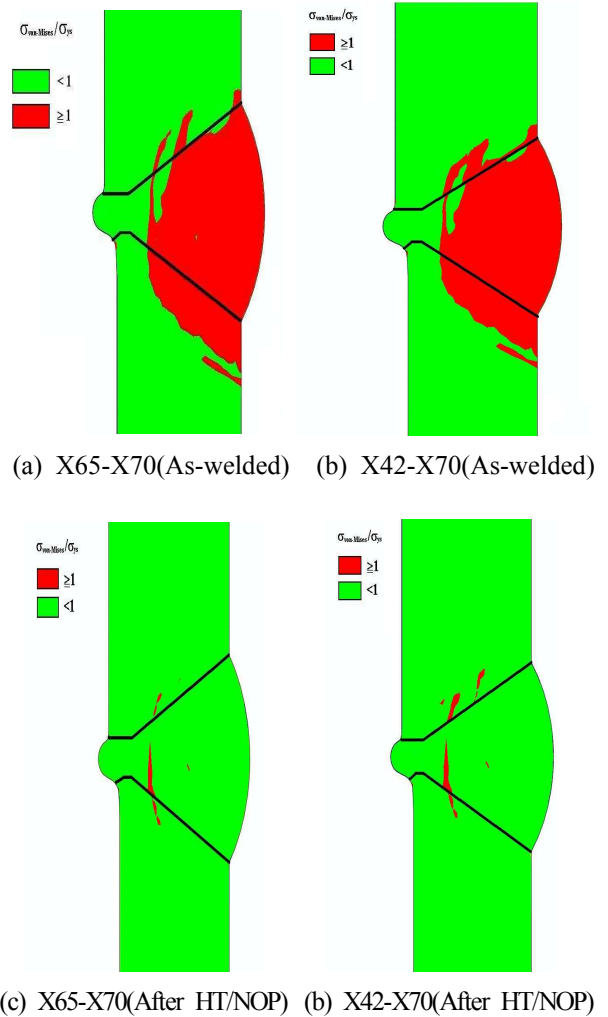


Fig. 21 Comparison of yielding regions between X65-X70 weld and X42-X70 weld

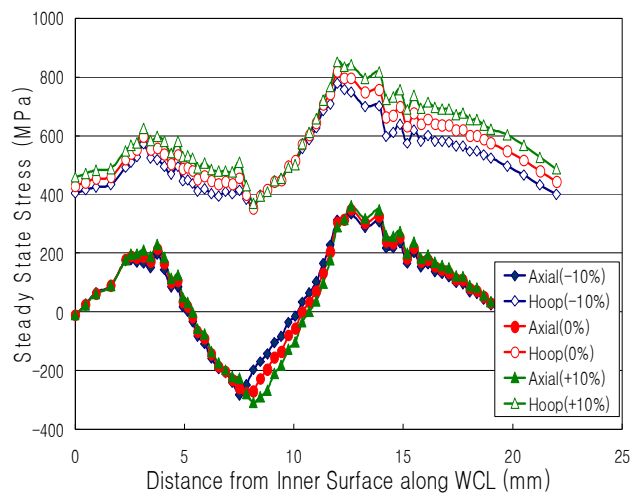


Fig. 22 Variation of steady state stress distributions along welding centerline vs. weld metal yielding strength

4. 결 론

천연가스 매설 배관 용접부의 잔류응력에 미치는 강도 불일치를 포함한 용접 및 재료 변수의 영향을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 균열 구동력 유발 잔류응력 분포 양상 측면에서 입열량은 잔류응력 분포에 큰 영향을 미치지 않음
- 덧살 제거시 내면의 최대 축방향 응력값은 증가하고 외면의 응력분포는 상당히 변화하며 기계적 강도가 낮은 기존 강 배관의 외면 쪽 축방향 응력은 감소하는 반면 원환 응력은 증가하는 경향을 보임
- 모재 간 강도 불일치는 잔류응력 분포에 큰 영향을 미치지 않음
- 용접금속의 항복강도 증가시 외면 쪽의 원환 응력은 증가하는 반면 다른 부위 또는 다른 성분의 잔류응력은 미미한 증가를 보임여기에 결론을 입력하시오

참고문헌

- (1) <http://mailman.mcmaster.ca/mailman/private/cdn-nucl-1/0407/msg00052.html>.
- (2) Kim, J.S., Jin, T.E., Dong, P. and Prager, M.,

2003, "Development of Residual Stress Analysis Procedure for Fitness-for-Service Assessment of Welded Structure," *Transactions of the KSME A*, Vol.27, No.5, pp.713-723.

- (3) Song, T.K, Bae, H.Y., Kim, Y.J. Lee, K.S., and Park, C.Y., 2008, "Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Estimating Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weldment in Nuclear Power Plant," *Transactions of the KSME A*, Vol.32, No.9, pp.770-781.
- (4) Dong, P., et al., 2000, Recommendation for Determining Residual Stresses in Fitness-for-Service Assessment, WRC Bulletin No.476.
- (5) Dong, P. and Brust, F.W., 2000, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: a Millenium Review and Beyond," *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.122, No.3, pp.329-338.
- (6) ASME & API, 2007, Fitness-for-Service, API 579-1/ASME FFS-1, 2nd Edition.
- (7) KOGAS, 2005, Welding Procedure Specification, WPS-X70- X65, Rev.0.
- (8) ASME B&PV Committee, 2001, ASME B&PV Code, Sec.II, Part D.
- (9) MSC, 2005, PATRAN User's Manuals, Ver. 2005 r2.
- (10) Simulia, 2009, ABAQUS User's Manuals, Ver. 6.8.