Journal of the Korea Society of Disaster Information Vol.11 No.4 ▌pp. 520 - 526

Available online at www.sodi.kr

가스압접 이형철근의 기계적 강도 특성 연구

A Study on the Mechanical Properties of Gas Pressure Welded Splices of Deformed Reinforcing Bar

Juntai Jeon[a,*]

a Inha Technical College, Incheon 22212, Republic of Korea

A B S T R A C T

Reinforcing bar splices are inevitable in reinforced concrete structure. In these days, there are three main types of splices used in reinforced concrete construction site - lapped splice, mechanical splice and welded splice. Low cost, practicality in construction site, less time consuming and high performance make gas pressure welding become a favorable splice method. However, reinforcing bar splice experiences thermal loading history during the welding procedure. This may lead to the presence of residual stress in the vicinity of the splice which affects the fatigue life of the reinforcing bar. Therefore, residual stress analysis and tensile test of the gas pressure welded splice are carried out in order to verify the load bearing capacity of the gas pressure welded splice. The reinforcing bar used in this work is SD400, which is manufactured in accordance with KS D 3504. The results show that the residual stresses in welded splice is relatively small, thus not affecting the performance of the reinforcing bar. Moreover, the strength of the gas pressure welded splice is high enough for the development of yielding in the bar. As such, the reinforcing bar with gas pressure welded splice has enough capacity to behave as continuous bar.

KEYWORDS

Gas Pressure Welding
Deformed Reinforcing bar
Residual Stress
Three-dimensional Finite Element Analysis
Mechanical Properties

철근 콘크리트 구조에서 철근의 이음은 불가피하게 사용된다. 최근 들어 철근 콘크리트 구조물에 가장 많이 사용되고 있는 철근 이음에는 겹침 이음, 기계 이음, 그리고 용접 접합 등이 있다. 이중에서 저비용, 건설 현장에서의 실용성, 공사 기간 단축 및 고성능 등의 장점으로 인하여 가스 압접 이음의 효용성이 대두되고 있다. 그러나 가스 압접 이음 과정동안 철근이 열을 받게 되고 이는 접합부 주위에 잔류 응력으로 남아 철근의 피로수명에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 가스 압접 접합부의 명확한 잔류 응력 분석과 가스 압접 후 철근의 하중지지 능력을 확인하기 위한 인장 시험이 수행되어야 한다. 이 연구에서는 공용중인 철근(KS D3504 SD400)에 대하여 3차원 해석을 수행하여 연구 결과 잔류 응력은 상대적으로 작기 때문에 철근의 피로 수명에 영향을 미치지 않으며 인장 실험 결과에서도 가스 압접된 철근의 항복강도가 기준항복강도보다 높게 측정되어 하중 저항 능력도 가스 압접 이음부가 연속된 철근으로서의 거동에 충분히 그 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

가스압접법
이형철근
잔류응력
3차원 유한요소 해석
강도특성

ⓒ 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-32-870-2235. Email. jtjeon@inhatc.ac.kr

ARTICLE HISTORY
Recieved Nov. 02, 2015
Revised Nov. 25, 2015
Accepted Dec. 17, 2015

1976-2208 ⓒ 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.15683/kosdi.2015.11.4.520

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 공학적인 면과 경제적인 면에서 많은 장점을 가진 건설재료로서 (Jack et al. 1993) 최근에는 국내외적으로 사장교 및 현수교 등의 장경간 교량과 초고층 건축물의 건설이 지속적으로 이루어지고 있고 이에 따라 고강도 콘크리트 및 고강도 철근과 대직경 철근의 사용이 보편화되고 있다. 그리고 철근의 배근방법과 배근량 등이 구조물의 안전성과 시공성, 경제성에 큰 영향을 미치고 있는데 공용중인 철근은 길이가 한정되어 이음이 필수적으로 필요하며 철근이음의 종류로는 겹침 이음, 기계 이음, 용접 접합이 대표적이다. 겹침 이음은 철근지름이 커질수록 겹침 부분의 철근량이 많아져 보와 기둥의 접합부는 철근배근이 매우 복잡하여 시공이 어렵고 경제성이 떨어진다. 용접이음은 현장작업과 수직방향 철근의 이음이 불편하며 기계적 이음은 시공 단가가 비싸다는 단점이 있다. 반면에 가스 압접 이음은 연결부 철근의 길이 및 직경의 변화가 적고 이러한 기하학적 조건에 따라 콘크리트와의 부착력에도 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 기계이음 등 보다 연결부 콘크리트 주위의 응력집중을 줄일 수 있으며 응력전달에도 효과적이다. 또한 시공이 간편하고 압접장비의 운반이 용이하여 현장에서 신속하고 정확한 이음을 할 수 있다는 장점이 있어 사용이 계속 증가하는 추세이다.

일본의 경우 1950년대부터 철근 가스압접의 기술개발 및 연구를 통해 현재 19mm~51mm까지의 철근들을 가스 압접 이음하고 있다. 미국은 1944년 압접에 대한 연구 성과 보고 이후 지속적인 개발이 이루어지고 있으나 철근 압접에 대한 기술개발은 미진하며 유럽의 경우도 독일과 러시아(구 소련)에서도 압접에 대한 실험은 활발하였으나 실용화에는 한계점을 보이고 있다(Seo et al, 2005). 국내의 경우에는 1970년대 일본 기술진에 의해 서울 하얏트 호텔신축공사에서 사용된 것이 최초이며 숙련공의 양성 및 확보 미비, 시공단가의 비현실성, 현재는 이음협회에서 주관하고 있으나 이전까지 인정자격제도의 미비 등 개발이 미미한 상황이었다. 근래에 들어서 레일 접합부의 피로균열 진전거동 평가와 안전성 실험 연구가 수행되었고 철근의 강도 실험 등이 수행되었다 (Kang et al, 1999; Kim, 2012; Cho et al, 1995).

철근의 가스압접 및 용접이음 시에는 필연적으로 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 구조물의 거동에 악영향을 미칠 수 있는데, 특히 용접부 인근에 발생하는 인장 잔류응력은 응력집중, 피로손상 및 취성파괴 등을 야기 시킬 수 있으므로 (Withers, 2007) 잔류응력의 거동을 파악하는 것은 대단히 중요하지만 용접 공정 중에 수반되는 국부 가열, 조직 변화 등과 같은 복잡성으로 인해 용접부의 잔류응력을 정확하기 예측하기는 매우 힘들다. 따라서 유한요소법과 같은 수치해석 방법이 잔류응력의 크기 및 분포 특성 그리고 생성 메카니즘을 규명하는데 많이 사용되어 왔다 (Goldak et al., 2005; Lindgren, 2001). 가스 압접된 철근의 경우 이러한 잔류응력에 대한 연구는 미미하다. 따라서 이 연구에서는 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 가스 압접된 철근 접합부의 잔류응력과 대변형 변위 분석을 수행하고 철근의 인장강도 실험을 통하여 가스 압접된 철근이음부의 역학적 거동을 평가하였다.

2. 해석 방법 및 모델

가스압접에 의한 잔류응력을 정확히 해석하기 위해서는 온도 분포를 시간에 대한 함수로 구할 수 있는 열 해석과 열해석으로 부터 구한 온도이력을 이용하여 응력을 구할 수 있는 역학적 해석이 필요하다. 온도 영역은 응력장에 큰 영향을 미치지만 응력장은 온도 이력에 미미한 영향을 주므로 순차적인 연계해석이 이용된다. 따라서 이 연구에서는 열 해석에서 응력 해석으로 순차적으로 연계된 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하여 가스 압접된 철근의 잔류응력을 모사하였다.

2.1 열전달 및 응력-변형 해석

용접시 용접부의 가열과 냉각에 의해 발생하는 온도 분포 및 이력은 이동열원을 고려한 3차원 비정상 열전달 해석을 수행하여 구할 수 있으며 그 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 T는 온도, K는 열전도율, c는 비열, ρ는 밀도이고 Q는 단위 체적당 이동 입열량이다. 입열은 표면입열과 체적입열을 동시에 고려하였다 (Deng et al., 2007).

열전달 해석으로 부터 계산된 온도이력을 온도하중으로 도입하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하여 잔류응력을 구하였다. 이 연구에서 3차원 해석시 요소의 변위-변형률 관계는 다음과 같이 대변형을 포함하여 표현하였다(Lee et al., 2007).

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{xy}\}^T \tag{2}$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon_L\} \tag{3}$$

여기서 $\{\varepsilon_0\}$과 $\{\varepsilon_L\}$은 각각 소변형률과 대변형률을 나타낸다.

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u/\partial x \\ \partial v/\partial y \\ \partial w/\partial z \\ \partial w/\partial y + \partial v/\partial z \\ \partial u/\partial z + \partial w/\partial x \\ \partial v/\partial x + \partial u/\partial y \end{Bmatrix} \qquad \{\varepsilon_L\} = \frac{1}{2}\begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial y}\cdot\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y}\cdot\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\cdot\frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial z}\cdot\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\cdot\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}\cdot\frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\cdot\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\cdot\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x}\cdot\frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{Bmatrix} \tag{4}$$

탄성 변형률 증분은 후크의 법칙을 이용하여 구하였으며, 열 변형률 증분은 선팽창 계수를 이용하여 계산하였다. 소성 변형률 증분 계산을 위해서 미세스 항복 이론 및 온도 의존성을 가지는 기계적 제성질과 선형 변형률 경화를 이용하여 구성식을 마련하였다. 응력-변형률 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D_d]\{d\epsilon\} - \{c_t\}dT \tag{5}$$

여기서 $[D_d]$는 응력-변형률 메트릭스로서 탄성의 경우는 $[D_d^e]$, 소성의 경우에는 $[D_d^p]$로 분리된다. $\{c_t\}$는 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력증분에서의 영향을 나타낸다.메타카올린(metakaolin)의 원료인 카올린(kaolin)은 원래 중국 강서성에서 산출되는 자색의 점토로서 도자기를 만드는데 사용된 광석에 대하여 붙여진 광석명이다. 국내에서 산출되는 카올린은 대부분 할로이사이트(halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화잔류형 광상에 많이 분포하고 있다(Mehta and Monteiro, 2006).

메타카올린은 ASTM C 618의 N급 포졸란으로 제조된 지역의 카올린 광물에 따라 약간씩 물리·화학조성이 변할 수도 있으며, 색깔 또한 백색 및 연황색 등이 있다. 이러한 색상의 차이는 함유된 미량성분에 따라 변하게 되는데, 주로 Fe_2O_3 성분에 의해 차이가 발생한다. 메타카올린의 미세구조는 Fig. 1에 나타내었다(Cucio et al., 1998; Moulin et al., 2001).3

2.2 해석 모델

본 연구에서 사용된 철근은 직경이 16mm 부터 51mm 까지 11개의 크기를 선택하였다. 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 길이는 직경의 10배로 하고 아이소 파라메타를 이용한 3차원 8절점 육면체 요소를 사용하였으며 응력해석시

의 경계조건은 Fig. 2에 나타내었다. 가스압접 시 철근에 열과 압축력(10 MPa)을 동시에 가하였으며, 열전달해석과 온도에 의존하는 철근의 재료 물성치에 따른 잔류응력 해석을 수행하였다. 열 해석에 있어서 용접 시 가해지는 열은 접합부 주위의 외측 표면에 적용된다. 그리고 가열되는 표면의 길이는 철근 직경의 0.8배이며(Fig 1. 참조), 가열온도는 실제 가스압접시의 온도인 1,200℃에서 1,300℃로 정하였다. 용접면의 경계조건은 x방향의 변위는 고정이며, y방향과 z방향은 회전을 방지하기 위해 두개의 노드를 고정하였다. 반대쪽 표면은 10Mpa의 압력으로 가압하였다.(Fig. 2 참조) 그리고 잔류응력 해석은 이전 단계의 온도해석으로 부터 생성된 절점 온도를 온도하중으로 사용하였다. 가스압접 시 철근의 정확한 잔류응력 현상을 이해하기 위하여 온도에 따른 철근의 축방향, 반경방향, 원주방향의 응력을 해석하였다.

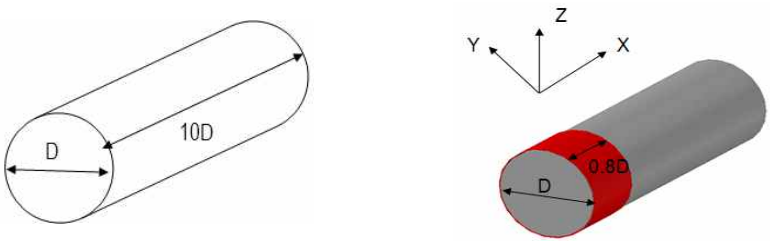


Fig. 1. Reinforcing bar model and heated area

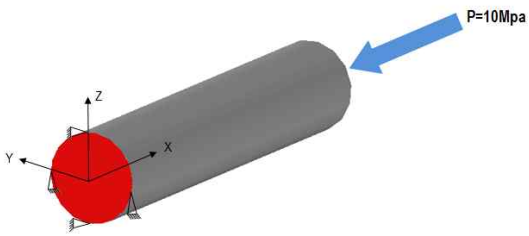


Fig. 2. Boundary and loading condition

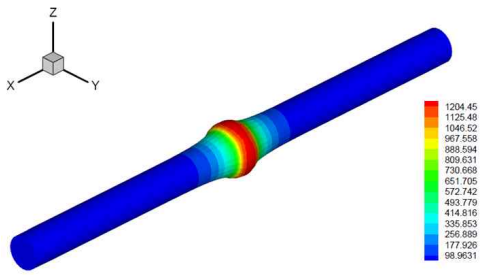
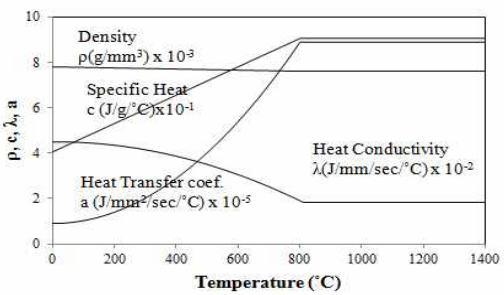
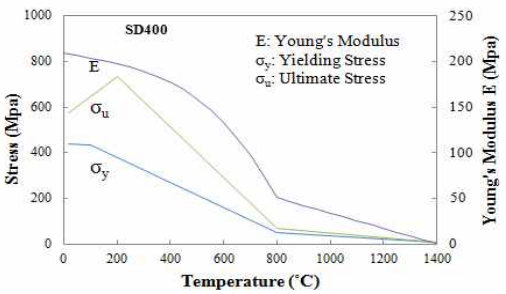


Fig. 3. Temperature of the deformed body

해석 시 사용된 재료는 KS 기준을 따르는 철근(KS D3504 SD400)이며 이 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도의존성을 Fig. 4에 나타내었다. 팽창계수는 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} (1/℃)$이며 포아송비는 0.3이다.



(a) Thermo-physical properties



(b) Thermo-mechanical properties

Fig. 4. Thermo-physical and Thermo-mechanical properties

3. 가스 압접된 철근의 역학적 특성

3.1 잔류응력

가스압접 시 철근에 발생하는 잔류응력을 Fig. 5와 같이 철근의 축방향, 반경 방향, 그리고 원주방향에 대해서 해석하였다. 직경이 16mm인 철근에 대하여 각 방향의 잔류응력 중에서 철근의 중심으로 부터 거리가 직경의 0.15, 0.25, 0.35 그리고 0.45배

에 대하여 정리하고 그 결과를 Fig. 6 ~ Fig. 8에 나타내었다. 잔류응력 해석 결과에 따르면 온도구배와 가열시간에 따라 각 직경마다 잔류응력의 크기가 약간씩 다르게 나타났으나 최대 잔류응력의 크기는 3MPa 보다 작게 나타났다. 용접부 인근에서 축방향에 대한 잔류응력은 내측에서 인장 잔류응력, 외측에서 압축 잔류응력을 보임을 알 수 있다. 이것은 반경 방향의 온도 구배에 따른 결과로서 가열 후에 주위 대기상태와 밀접한 관련이 있는 철근 외측 표면의 온도는 대기와의 높은 열전달율로 인하여 급격히 떨어지게 된다. 그러므로 철근 내측의 온도는 외측의 온도보다 높게 되고 따라서 철근 내측에서는 인장 잔류응력이 발생하고 외측에서는 압축 잔류응력일 발생하게 된다. 반경 방향과 원주 방향의 잔류 응력 특성은 종방향 및 반경방향에 대한 온도구배를 함께 고려하므로 좀 더 복잡하나 축방향 잔류응력 현상과 비교하여 크게 다르지 않았다. 용접부에 인접한 곳은 높은 온도로 인하여 인장 잔류응력이 발생하였고 용접부에서 떨어진 곳에서는 힘의 평형에 의하여 압축 잔류응력이 발생하였다.

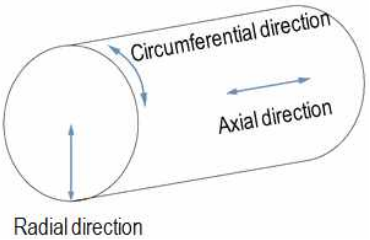


Fig. 5. Stress direction

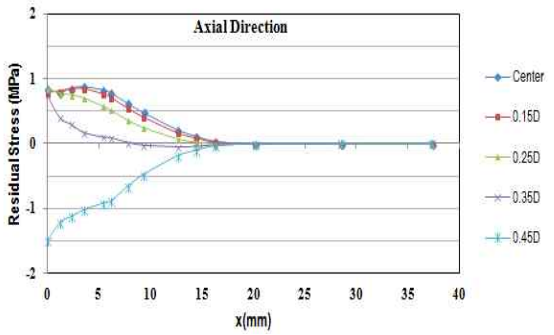


Fig. 6. Residual stress in axial direction(D16)

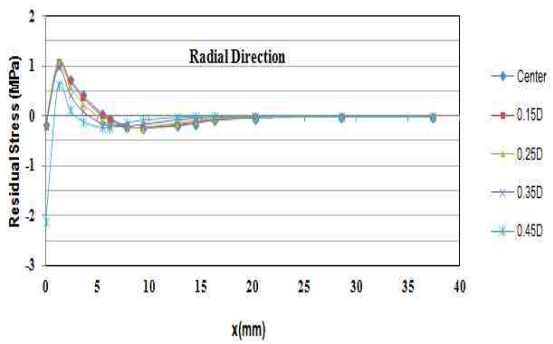


Fig. 7. Residual stress in radial direction(D16)

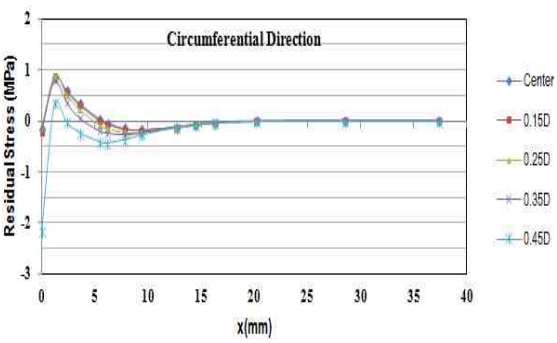


Fig. 8. Residual stress in circumferential direction(D16)

3.2 잔류변형

가스 압접 시 발생하는 열하중에 의하여 접합부 인근은 변형이 발생하며 이것은 고온에서 철근의 낮은 탄성계수로 인한 것으로 상대적으로 크게 나타난다. 이러한 접합부의 부풀림 현상은 Fig. 9와 같이 용접 표면의 변위가 철근 직경의 1/4 이하일 것, 용접부 팽창 직경이 철근 직경의 1/4 이상일 것, 철근 축 중심의 편심이 철근 직경의 1/5 이하일 것, 용접부의 길이는 철근 직경의 1.1배 이상일 것이라는 네 가지의 가스 압접의 요구 조건을 충족 시켜야 한다. 철근 중심으로부터 철근 직경의 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 그리고 0.5배의 거리에서의 변위를 철근 길이에 따라 정리하였다. Fig. 10 ~ Fig. 11은 각각 D16 철근의 반경 방향 및 축방향의 변위를 나타낸 그림이다.

결과를 보면 반경 방향의 변위는 열이 가해진 접합부에서 주로 발생하고 이는 높은 온도로 이하여 철근의 탄성계수가 낮아지기 때문이며 변형도 크게 발생한다. 축방향 변위도 반경 방향의 변위와 유사하게 열하중으로 인한 접합부의 변위는 빠르게 증가하나 열하중의 영향이 미치지 않는 곳에서는 일정하게 유지되고 있다. 따라서 철근의 수축 또한 접합부에 가까운 가열 영역에서 발생한다.

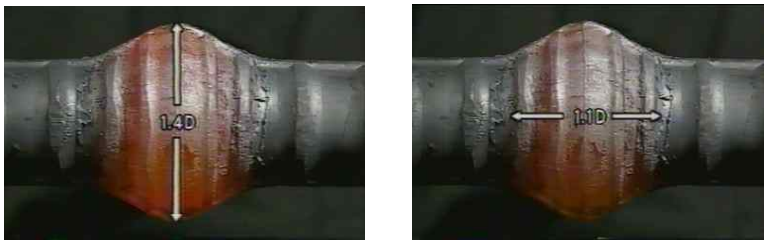


Fig. 9. Dimension of bulge shape at rebar

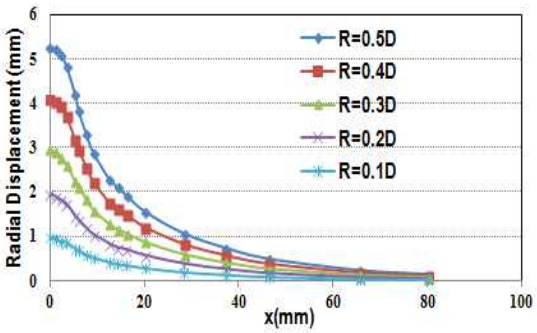


Fig. 10. Radial displacement in reinforcing bar(D16)

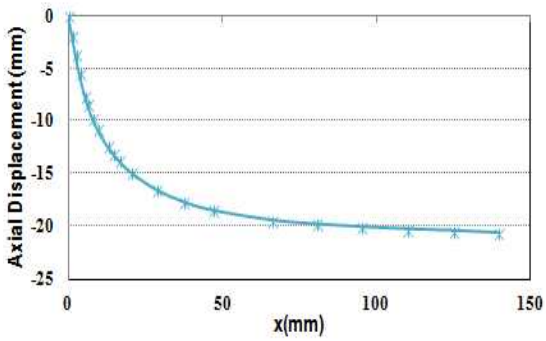


Fig. 11. Axial displacement in reinforcing bar(D16)

3.3 인장시험

가스 압접 전·후의 철근의 하중 저항 능력을 비교하기 위해 용접된 철근과 용접되지 않은 철근에 대하여 인장실험을 수행하였다. 실험에 사용된 철근은 D25와 D32 철근을 이용하였다. Fig. 11은 철근 시편의 사진이며 실험 결과는 Table. 1과 Table. 2에 정리하였다. 인장 실험 결과를 살펴보면 철근의 극한응력과 항복응력 모두 용접 후 감소하였으나 사용된 철근의 기준항복응력인 400MPa보다는 여전히 높은 값을 가지고 있으므로 소요강도 확보에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 12. Specimens with welding join

Table 1. Tensile test of reinforcing bar without welded join

Specimen	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
D25	505	615
D32	537	664
D32	508	632
D32	536	648

Table 2. Tensile test of reinforcing bar with gas pressure welded join

Specimen	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
D25+D25	434	571
D25+D25	428	576
D32+D32	460	588
D32+D32	465	593

4. 결 론

이 연구에서는 가스압접으로 접합된 철근의 역학적 거동 특성을 파악하기 위하여 잔류응력 해석을 수행하였다. 또한 가스 압접된 철근 접합부의 하중저항 능력을 인장시험을 통하여 확인하였다. 연구 수행 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 잔류응력 해석 결과에 따르면 온도구배와 가열시간에 따라 각 직경마다 잔류응력의 크기가 약간씩 다르게 나타났지만 최대 잔류응력의 크기는 3MPa 보다 작게 나타났다. 축방향에 대한 잔류응력은 내측에서 인장 잔류응력, 외측에서 압축 잔류응력을 보이고 있으며, 반경 방향과 원주 방향의 잔류 응력 특성은 축방향 잔류응력 현상과 비교하여 크게 다르지 않았고 용접부에 인접한 곳은 높은 온도로 인하여 인장 잔류응력이 발생하였고 용접부에서 떨어진 곳에서는 힘의 평형에 의하여 압축 잔류응력이 발생하였다.

(2) 잔류변형 해석의 결과를 살펴보면 결과를 보면 축방향 및 반경 방향의 변위 모두 열하중의 영향으로 인하여 접합부에서 크게 발생하였다. 따라서 철근의 수축 또한 접합부에 가까운 가열 영역에서 발생하였다.

(3) 가스 압접된 철근의 인장 실험 결과에서는 철근의 극한응력과 항복응력 모두 용접 후 약간 감소하였으나 기준항복응력인 400MPa보다는 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 가스 압접된 철근의 하중 저항 능력은 가스 압접 이음부가 연속된 철근으로서 거동하는데 문제가 없도록 충분히 그 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

Cho, B.H., Yoon, Y.H., Yang, J.S., Park, B.K., Yang, Y.S. (1995). “An experimental study on the mechanical properties of gas pressure welded joints of deformed reinforcing steel bars.” Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Vol. 15, No. 2, pp.643-650

Deng, D., Liang, W. and Murakawa, H. (2007). “Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements.” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183, pp.219-225.

Goldak, J. and Akhlagi, M. Computational welding mechanics, Springer, 2005.

Jack C. McCormac and James K. Nelson. Design of reinforced concrete ACI 318-05 Code Edition, 7thed., HarperCollinsCollegePublishers, 1993

Kang, K.W., Lee, J.S., Choi. L., Kim, J.K. (1999). “The behavior of fatigue crack growth in welded rail by gas pressure welding.” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp.697-702

Kim, K.S. (2012). “An Experimental Study on Strength Safety of Rail Steel using Gas Pressure Welding.” Journal of the Korean society for railway, Vol. 15, No. 3, pp.266-271.

Lee, C. H. and Chang, K. H. (2007). "Numerical analysis of residual stresses in welds of similar or dissimilar steel weldments under superimposed tensile loads." Computational Material Science, Vol. 40, pp. 548-556

Lindgren, L-E. (2001). “Finite element modelling and simulation of welding, Part 2 Improved material modeling.” Journal of Thermal Stresses, Vol. 24, pp.195-231.

Seo, D.S., Song, K.J., Hwang, K.T., You, B.T. (2005). “The developing direction of korean gas pressure welding machine.” The Korea Institute of Building Construction, Vol. 5, No. 3, pp.131-138

Withers, P.J. (2007). “Residual stress and its role in failure.” Reports on Progress in Physics, Vol. 70, pp. 2211-2264.

Jeon, J. T., Lee, C. H., Chang, K.H. (2015). “Behavior of girth-welded buried steel pipes under external pressure” Journal of The Korean Society of Disaster Information, Vol. 11, No. 1 pp.1-8