

API X65강 레이저용접부의 용접잔류응력 및 파괴인성 특성

The characteristic of residual stress and fracture toughness on the welded joint of API X65 by laser welding

노찬승*, 방한서**, 고민성*, 김성주*, 오종인*

* 조선대학교 선박해양공학과 대학원

** 조선대학교 항공·조선공학부

1. 서 론

레이저 용접은 고에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 키홀의 용접이 가능하고 용융부가 좁고 깊은 용입이 얻어질 뿐만 아니라 아크 용접에서 문제가 되고 있는 용접변형을 저감할수 있다는 장점을 가지고 있어 대형구조물이나 파이프라인의 접합에 적용이 진행되고 있다. 특히 아크 용접에 의한 파이프라인의 접합은 파이프의 외부에서 용접을 진행하기 때문에 지면과 접촉하고 있는 하단부쪽은 작업공간의 확보에 많은 애로점을 가지고 있는데 비하여 고에너지빔 용접은 파이프의 내부에서 빔을 360° 회전시키면서 용접을 진행하므로 생산성향상을 기대 할 수 있다.

파이프라인 접합에 레이저용접을 유효하게 적용하기 위해서는, 용접시 겪게되는 역학적 제한상으로써 용접잔류응력 특성 및 용접부의 파괴인성을 파악하는 것이 선행되어야 한다.

따라서, 본연구에서는 API X65 라인파이프강의 레이저빔 용접부에 대하여 유한요소 해석을 통하여 용접잔류응력 특성을 고찰하였고, 3점굽힘 CTOD 실험 및 샤르피 충격시험을 하여 용접부의 파괴인성 특성을 고찰하였다.

2. 수치해석 및 실험 방법

2.1 사용재료 및 용접조건

API X65강의 화학조성 및 기계적 성질을 각

각 Table 1, Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.041	0.29	1.3	0.009	0.0006	0.28	0.16	0.041

Table 2 Mechanical properties

Tensile test				CVN	
σ_Y (MPa)	σ_T (MPa)	El.(%)	Y.R.(%)	Temp.(°C)	ave.(J)
391	573	34.4	68.2	-10	362

σ_Y :Yield stress, σ_T :Tensile strength,
El. :Elongation(G.L.=32mm), Y.R.:Yield to tensile ratio

용접은 맞대기 CO₂ 레이저용접으로 용접조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Welding condition of 12kw CO₂ LBW

Average output	Working gas	Gas capacity	Welding speed	Focus
10kW	He	40L/min	1.2m/min	189mm

용접시험편은 L=500mm, B=300mm, t=12mm, 평판 맞대기 접합으로 Fig. 1에 나타내었다.

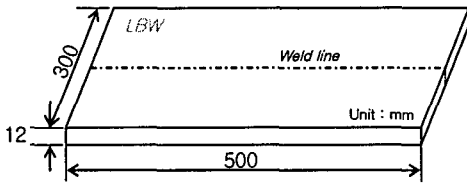


Fig. 1 Configuration of welded specimen.

2.2 수치해석 및 실험

유한요소해석은 2차원 열전도 및 열탄소성 해석을 수행하였으며, 용접선 길이방향의 중앙단면에서 시험편의 대칭성을 고려하여 1/2모델에 대하여 4절점 아이소파라메트릭 요소를 사용하였고, 유한요소 해석시에는 물리정수 및 재료정수의 온도 의존성을 고려하여 해석의 정도를 높이고자 하였으며, 요소분할은 Fig. 2와 같다.

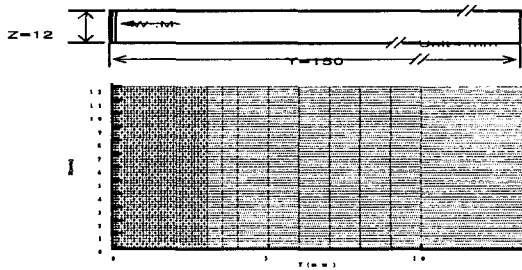


Fig. 2 Mesh division

용접금속의 파괴인성 실험으로 $-60^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 샤르피 충격시험과 3점굽힘CTOD 실험을 수행하였다. 샤르피 충격시험편은 Fig. 3에 3점굽힘 시험편은 Fig. 4에 각각 나타내었다.

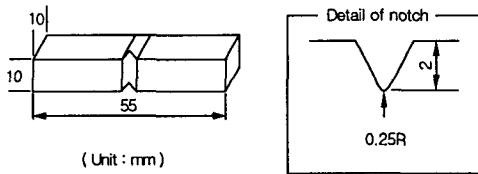


Fig. 2 Charpy impact test specimen.

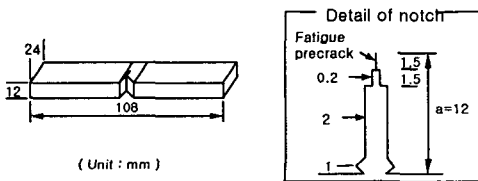


Fig. 3 3-point bend CTOD specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석

Fig. 4는 용접금속의 시간에 따른 온도이력을 도시한 것으로써 두께방향의 상층부, 중앙부, 하층부에서 각각 온도이력을 비교한 것이다. 전체적으로 1초 미만의 짧은 시간동안에 급열, 급냉의 과정을 겪고 있으며, 두께에 따른 온도분포는 상층부에서 가장 높은 온도가 형성되고 다음은 하층부, 중앙부의 순으로 나타나고 있는데 이것은 레이저빔 용접의 특성상 표면(상층부)로부터 빔이 조사되어 두께방향으로 관통되면서 용접이 이루어지 때문에 상층부가 보다 고온이 되는 것으로 생각되며, 중앙부에 비하여 하층부에서 보다 고온이 되는 것은 하층부에서 열이 집적되기 때문으로 생각된다.

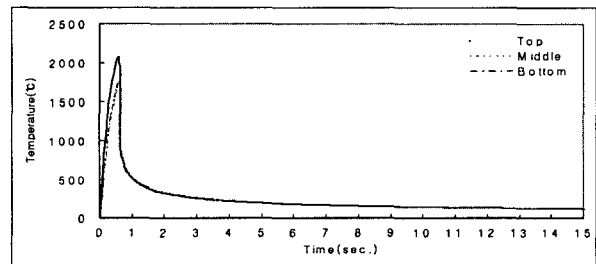
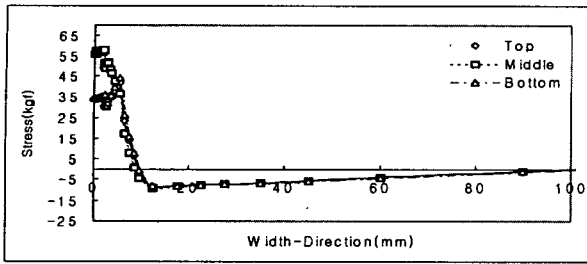
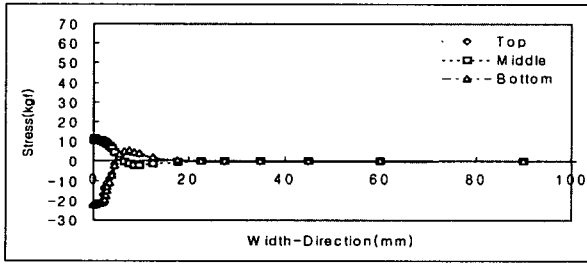


Fig. 4 Temperature variations with time

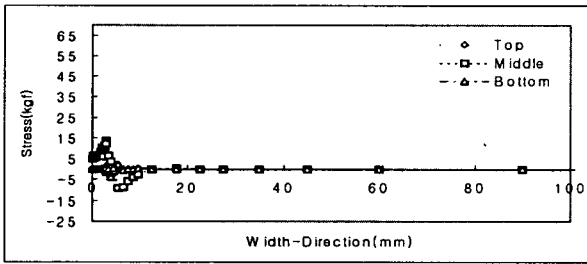
Fig. 5는 폭(Y)방향을 따라 분포하는 용접잔류 응력을 나타낸 것으로써 (a)는 용접선 길이방향 응력(σ_x), (b)는 용접선직각방향응력(σ_y), (c)는 두께방향응력(σ_z)을 두께방향으로 상층부, 중앙부, 하층부로 나누어 각각 도시한 것이다. σ_x 는 용착금속에서 높은 인장응력이 잔류하고 두께별로는 중앙부에서 가장 높게 나타나고있으며 상층부와 하층부에서는 크기 및 경향이 거의 유사하게 나타나고 있다. σ_y 는 고응력이 잔류하는 용착 금속 및 열영향부에서 상·하부는 압축응력이 잔류하는 반면 중앙부는 인장응력이 잔류하는 특징을 보인다. 반면 두께방향응력인 σ_z 는 상대적으로 낮은 응력이 잔류하고 있다. 또한 전응력성분들이 중앙부를 기점으로 대칭적으로 나타나는 것을 알수 있는데 이는 두께별 냉각속도의 차이에 기인하는 것이라 사료된다.



(a) σ_x



(b) σ_y



(c) σ_z

Fig. 5 Residual stress patterns transverse to the weld line

3.2 파괴인성 실험

Fig. 6은 용접금속 중앙부에 노치를 설계한 표준 샤르피시험편을 이용하여 $-60^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 충격시험을 수행한 결과이다. -45°C 와 0°C 에서 흡수에너지가 높은 시험편과 낮은 시험편이 존재하지만 전체적으로 고인성의 결과값을 나타내고 있다.

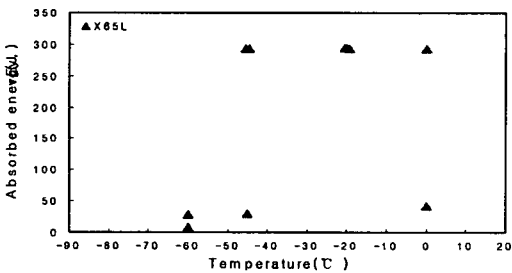


Fig. 6 Charpy transition curve

Fig. 7은 3점굽힘CTOD 실험결과를 나타낸 것으로써 -20°C 을 전후하여 점진적으로 증가하는 특성을 보이고 있다.

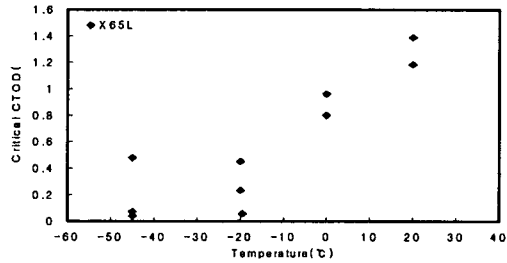


Fig. 7 Temperature dependency of critical CTOD

4. 결 론

본 연구에서는 라인파이프강(API X65) 레이저용접부의 용접잔류응력 및 파괴인성 특성을 수치해석과 실험을 통하여 검토한 결과, 용접잔류응력의 최대값은 판 두께 중앙부에서 나타나고, 중앙부를 경계로 상하 대칭적인 잔류응력이 분포하는 특징이 있으며, 폭방향응력 σ_y 가 상하표면부에서 압축응력이 잔류하는 특징이 있어 표면에서 발생하는 폭방향으로의 균열 진전을 억제하는 역할을 할 것으로 사료된다. 파괴인성 실험결과 양호한 인성값이 얻어짐을 알수 있었다. 따라서 레이저용접의 적용이 가능할것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 방한서 : 고장력강 용접부의 열 역학적 거동에 관한 수치해석적 연구, 한국해양공학회지, 12-4(1998), 33-42
2. Kunihiko Satoh, Masao Toyoda : Fracture Toughness Requirements and Fracture Toughness Testing of Welds, JWS. 55-3(1986), 144-152