

용접구조물의 구속효과와 균열발생특성간 상관관계

이제명* · 백점기* · 윤동렬**

*부산대학교 조선해양공학과

**삼성중공업(주) 조선플랜트 연구소

A Relationship Between Restraint Effect of Weldment and Crack Initiation Characteristics

JAE-MYUNG LEE*, JEOM-KEE PAIK*, DONG-RYUL YOON**

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

**Shipbuilding & Plant R&D Center, Samsung Heavy Industries, Geje, Korea

KEY WORDS: Finite Element Method 유한요소법, Restraint Intensity 구속도, Diffusible Hydrogen 확산성수소, Preheating Temperature 예열온도, Welding Induced Crack 용접유기균열

ABSTRACT: In this paper, a practical design criteria for judgement of crack occurrence in weldments is presented as a function of typical welding parameters, such as diffusible hydrogen, restraint intensity, and preheating temperature. The elastic analyses using the finite element techniques are employed in order to quantify the restraint intensities, numerically. Systematic experiments are also conducted in order to investigate the propensity of crack to typical welding parameters. The results of numerical estimation using the proposed method for the experimental specimens show the usefulness as a practical tool in welding induced crack problems with extensive uncertainties.

1. 서 론

용접은 접합효율의 우수성, 기밀·수밀성의 확보 등과 같은 장점을 이유로 선박 및 해양구조물 등을 포함한 대부분의 강구조 연결부에 사용되는 가장 일반적인 공법이다. 그러나 이러한 장점과 함께 존재하는, 용접부 균열 등을 포함하는 용접 결함이 구조물의 건전성저해, 재시공에 따른 추가비용 발생 등과 같은 문제를 일으키기도 한다(AWS D1.1).

용접결함은 크게 분류하여 변형문제와 균열문제로 나눌 수 있으며, 이 중에서 변형문제에 대해서는, 변형에측용 간이해석수법의 개발을 목적으로 하는 다양한 연구가 수행되어져 왔고(Ueda et al., 1994; Jang and Seo, 1995), 실제 설계현장에서도 적용되고 있다. 하지만 균열문제에 대해서는, 용접균열과 용접조건들의 정량적 관계를 규명하기 위해 과거 수많은 연구가 수행되어 그 연구성과들이 잘 정리되어 있음에도 불구하고(Satoh et al., 1983), 설계단계에서 유효하게 사용할 수 있는 기법은 아직 존재하지 않는다. 이는 변형문제에 비하여 비교적 정밀한 해석을 필요로 하기 때문에 상대적으로 간이해석수법개발이 미진한 까닭이라 할 수 있다.

하지만 최근, 새로운 구조개념의 선박 및 해양구조물이 등장함에 따라 초기 설계단계에서 적용 가능한 균열예지용 간

이해석수법의 필요성이 지속적으로 증가하고 있으며, 우선적으로 용접불량과 용접조건들과의 관계를 정량적으로 규명하는 것이 요구되고 있다.

용접구조물의 균열에는 다양한 종류의 영향인자가 존재하며, 대표적인 것으로는 재료의 파단 및 파괴를 촉진하는 가장 큰 원인으로 알려져 있는 용접잔류응력을 들 수 있다. 이 외에도 확산성수소 함유량, 용접구조물 자체가 가지는 구속효과 등이 있다. 이들 영향인자들에 대하여, Satoh et al.(1973)은 용접구조물의 기하학적 특징에 기인한 잔류응력을 바탕으로 구속응력을 구한 후, 이를 이용하여 균열발생방지를 위한 설계기준으로 제시한 바 있다. 최근에는 용접부에 대한 유한요소해석결과와 손상변수의 도입을 통한 정밀한 재료모델링기법을 바탕으로 용접부의 손상문제를 검토한 사례도 있다(이제명 등, 2002).

하지만, 이들 대부분 연구결과들을 실제 설계현장에서 사용하기 위해서는 적용범위의 확장이나 간이화기법도입의 필요성 등과 같은 몇 가지 개선요소들을 지니고 있는 것이 사실이다. 특히 구속효과와 균열의 상관관계에 대해서는, 명시적인 형태의 관계정립조차 이루어지지 않은 상태이며 그 중 대다수가 단편적인 연구들에 머물러 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는, 용접균열에 대한 지배적인 영향인자 중에서도 비교적 일관된 접근방법이 확립되지 않은 구조물의 구속효과, 즉 구속도를 정량적으로 정의하는 방법을 제시하고 나아가 예열온도, 확산성수소 등을 함께 고려한 균열발생예측기법을

제 1저자 이제명 연락처: 부산광역시 금정구 장전동 산 30
051-510-2342 jaemlee@pnu.edu

개발하고자 한다. 그리고 용접조건을 변화시키며 수행한 실험 결과와의 비교를 통하여 개발수법의 유용성을 검증한다.

2. 유한요소 해석을 이용한 구속도정의

실제구조물에 있어서 용접이음부의 거시적인 구속상태를 파악하는 것은 용접균열발생 대책수립에 있어 실용상 아주 중요하다. 이러한 이유로 몇 가지 전형적인 용접이음부에 대하여 구속응력을 구한 후, 이를 바탕으로 해당구조물의 구속도를 정의하는 연구가 다수 수행된 바 있다(Satoh et al., 1983). 그리고 이들 연구결과들에 의하면, 특정 형상의 구조물에 대해서는 구속도의 정의 및 정량적인 값을 구할 수 있지만, 점차 용접구조물이 복잡·다양해짐에 따라 일반성의 확보에는 성공하지 못했다.

본 장에서는, 유한요소해석수법을 이용하여 각종 용접조건 및 구속조건에 따른 용접부의 역학적 특성파악을 수행한 후, 이를 바탕으로 표준화된 구속도의 정의방법을 제시하였다.

2.1 용접비이드 적층효과와 잔류응력특성

골조구조나 판구조 등과 같은 경우, 임의 부재의 용접에 의한 수축은 그 주위부재에 의하여 구속되는 경우가 대부분이며 이것에 의해 용접부에는 구속응력이 발생한다. 과거 많은 연구에서 볼 수 있듯이, 이러한 구속응력은 균열발생과 밀접한 관계가 있기 때문에, 구속에 의해 발생하는 잔류응력은 용접구조물의 구속상태를 대변하는 유효한 수단의 한가지로 알려져 있다. 따라서 본 절에서는 다양한 용접조건 및 구속조건을 경계조건으로 채용한 유한요소해석을 통하여 구속효과에 의한 잔류응력특징을 분석하였다.

먼저, 용접비이드 적층에 따른 잔류응력변화를 살펴보기 위해, Fig. 1과 같은 필릿용접부를 대상으로 열탄소성해석을 수행하였다. 플랜지와 웨브는 각각 50mm 두께를 갖고, K형 그루브에는 좌우로 총 40층의 용접비이드가 적층된다. Fig. 2에는 실제 해석에 사용한 요소분할도를 보이고 있다.

해석결과의 신뢰성을 향상시키기 위해, 실제용접현상에 대한 고려를 비교적 쉽게 할 수 있도록 개발되어진 범용해석코드 SYSWELD+(2000)를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

3차원 이동열원효과를 고려한 실시간 용접시뮬레이션을 수행하였으며, 온도변화에 따른 상변태 및 각종 재료물성치의 온도의존성 등과 같은 용접공정 고유특성들을 고려한 과도해석을 수행하였다. 즉, Fig. 3에 보이고 있듯이, 각종 재료물성치, 즉 탄성계수, 열팽창계수, 항복응력 및 프와송비 등을 전 온도 범위에 걸쳐 온도의존형으로 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig.4는 잔류응력의 전형적인 분포 예로서 2번째 비이드가 적층된 후의 용접선방향 잔류응력분포를 나타내고 있다. Fig. 5는 각 비이드별 최대 및 평균잔류응력을 비교하여 나타내고 있다.

그림으로부터 알 수 있듯이, 정밀 유한요소해석을 통하여 용

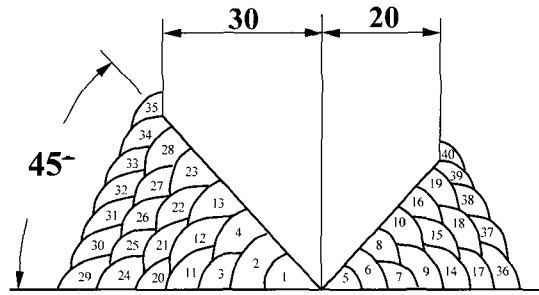


Fig. 1 Schematic view of cross-section of T-joint type weldment with 40 welding beads

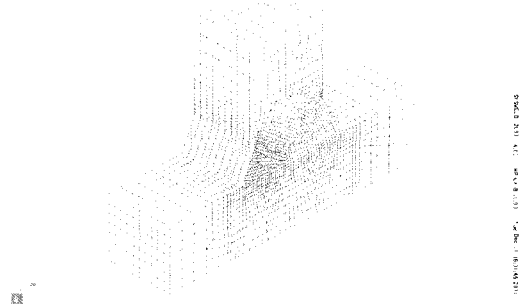


Fig. 2 Finite element mesh subdivision for thermal elasto-plastic analysis

Yield Strength (MPa)	Poisson Ratio	Thermal Expansion Coefficient (1/K)	Young's Modulus (GPa)
500	0.5	1.6E-05	200
450	0.475	1.5E-05	200
400	0.45	1.4E-05	180
350	0.425	1.3E-05	160
300	0.4	1.2E-05	140
250	0.375	1.1E-05	120
200	0.35	1E-05	100
150	0.325	9E-06	80
100	0.3	8E-06	60
50	0.275	7E-06	40
0	0.25	6E-06	20

Fig. 3 Temperature dependent material properties

접비이드 적층에 따른 잔류응력특성을 조사한 결과, 각 비이드별 잔류응력은 대체로 비슷한 수준의 값을 나타내고 있고, 따라서 용접비이드의 적층에 따른 잔류응력의 큰 편차는 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

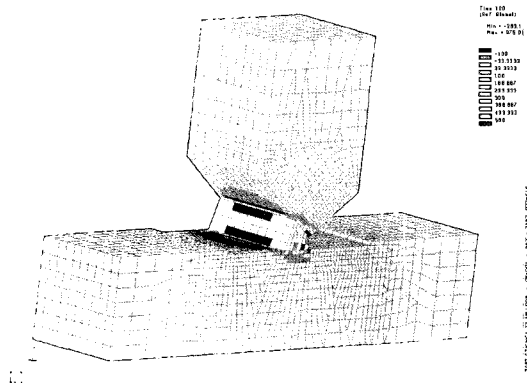


Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution after 2nd bead was laid down

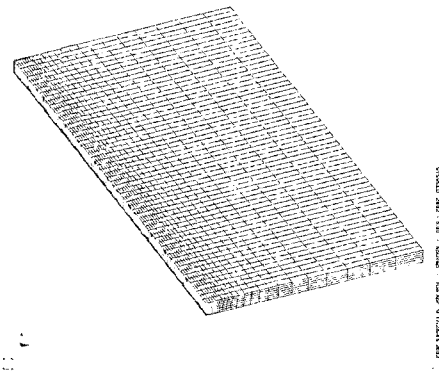


Fig. 6 Finite element mesh subdivision for the case of bead-on plate problem

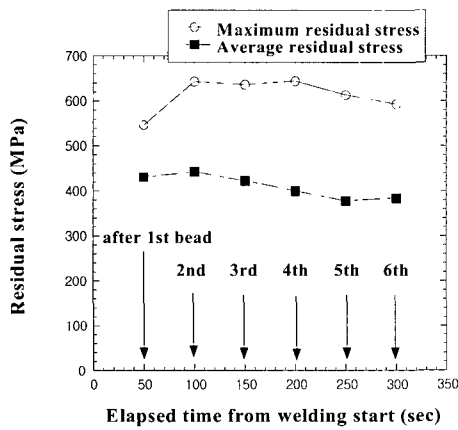


Fig. 5 Residual stress characteristics for the case of multi-pass welding

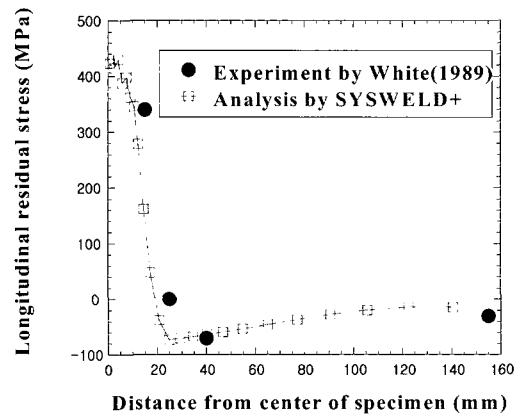


Fig. 7 Comparison longitudinal residual stress between numerical and experimental results

2.2 잔류응력특성에 대한 용접길이의 영향

전술한 바와 같이 용접비드의 적층효과를 무시할 수 있다면, 실제 다층용접문제라 하더라도 용접길이변화에 따른 잔류응력특성을 파악하기 위한 해석을 다층용접문제로서 수행한다는 것은 효율성 면에서 볼 때 명백히 불합리하다.

따라서 본 연구에서는, 단층용접문제를 대상으로, 경계조건을 변화시켜가며 시리즈 해석을 수행하였다. Fig. 6에 나타내는 해석용 모델에 대하여, 경계조건 및 용접길이변화의 영향을 파악하였다. 해석에 사용한 재료상수 및 구체적인 해석방법은 모두 2.1절과 동일하게 설정하였다. Fig. 7에는 해석방법의 신뢰성검토를 위해 동일한 문제를 대상으로 수행된 실험결과(Free and Goff, 1989)와의 비교를 보이고 있다. 용접길이(50, 100, 200, 300 mm) 및 양단경계조건을 변화시켜가며 수행한 해석결과를 Fig. 8에 나타내고 있다.

먼저 양단이 자유인 경우에서는, 용접길이가 길어진다는 것은 구조물중량이 늘어난다는 것이 되므로 자중효과에 의한 내적구속 혹은 자구속의 효과를 파악할 수 있다. 용접길이가 길어질수록 잔류응력이 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 중량이

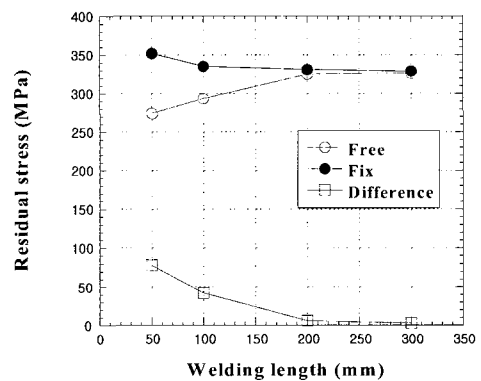


Fig. 8 Influence of welding length on the residual stress characteristics (restraint effect)

늘어날수록 자구속의 효과도 커짐을 나타낸다.

한편 양단고정의 경우는, 대상구조물이 주변의 다른 구조 혹은 부재에 의해 구속되어 있는 경우에 해당되므로 외적구속의 영향을 나타낸다고 볼 수 있다. 용접길이가 길어질수록 잔류응력은 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 8에서 보이고 있듯이 임의의 구속 효과에 의해 나타나는 역학적 변화특성의 대표적인 것으로, 비구속상태에 대한 잔류응력의 차이를 고려할 경우, 동일한 구속조건일 때 용접길이가 짧아질수록 구속효과는 커지게 되고, 용접구조물의 외부구속조건이 심할수록 구속효과는 커지는 것을 알 수 있다.

일반적으로 선박이나 해양구조물에서 균열발생사례가 가장 많이 보고되는 부분이 보수용접부위 혹은 고강성의 부재사이와 같이 외적구속이 큰 경우라고 알려져 있다. Fig. 8에서 나타내는 것과 같은 특징을 균열발생에 미치는 구속의 효과로 정의한다면, 주위가 구속이 되어 있는 용접구조물의 경우 용접길이가 짧을수록 구속효과는 증가하는 것이 된다. 구속효과가 클수록 균열발생사고 예가 많다는 것은 실제 현상을 통하여 잘 알려져 있으며, 본 연구에서와 같은 구속효과의 정의에 의하면 임의의 구조물에 대해서도 일반화가 가능하게 된다.

2.3 실제 용접구조물의 구속도 정의

실제 용접구조물의 역학적 특성파악을 위해 2.1, 2.2 절에서와 같이 열탄소성 파도해석을 매년 수행하기에는 현실적으로 많은 어려움이 존재한다. 본 절에서는 2.2절과 같은 구속효과를 표현할 수 있는 역학변수를 간이유한요소해석수법을 통하여 도출하였다.

만약 어떤 임의의 용접구조물이 그 주위에 고강성의 구조물 혹은 부재로 둘러싸여 있다면, 원래 자유로이 일어나야 할 용접수축변형이 억제되어, 자유로운 변형이 허용된 상태와 비교하였을 때 구조물 내부에는 역학적으로 다른 상태가 되어 있을 것임에 틀림없다. 따라서, 구속된 용접구조물에 대한 유한요소해석모델을 구성하고 강제변위 혹은 수축을 일으키는 하중을 가하여 해석을 수행한 후, 자유상태에 대한 결과와의 차이를 비교해 보면 구속의 효과를 쉽게 알 수 있을 것이다. 이러한 해석을 통해 얻어진 결과를 이용하여 해석대상구조물의 구속도를 정의하였다. 즉, 구속도란, “원래 변형이 자유롭던 구조물이 임의의 형태로 구속됨으로 인해 받을 수 있는 영향을 정량화시킨 값”으로 정의하였다.

본 연구에서는, 용접선 수축변형이 자유로운 상태와 억제된 상태의 차이에 주목하여, Fig. 9와 같은 해석대상 용접구조물에서 용접선 양단에 압축단위하중을 가하여 수축이 발생하도록 했다. 즉, 용접열에 의한 수축을 기계적인 압축하중에 의한 수축으로 치환한 문제를 가정하였다.

경계조건으로는 강제운동을 억제하는 최소한의 경계조건을 채용한 모델을 자유상태로 설정하였으며, 양 끝단상의 절점들의 병진자유도 성분을 강제구속하는 해석모델을 구속상태로 설정하였다.

실제해석에서는 범용유한요소 해석 코드 MSC/NASTRAN을 사용하였으며, 2차원 Shell 요소를 사용하여 이산화하였다.

우선, 해석모델상 용접선에 해당되는 선상에 위치한 모든 요소들의 평균변형률을 다음과 같은 식으로 계산한 후, 이 값을 구속계수(Constraint Factor)로서 정의하였다.

$$RF = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{eq}^i \times l^i}{L} \quad (1)$$

여기서 첨자 “i”는 용접선상의 요소를 의미하며, l 은 요소길이, L 은 해석모델의 길이이다. 그리고 구속도의 정의에 의해, 완전자유상태와 구속상태에 대해서 얻어진 구속계수의 차이를 아래와 같이 구한 후, 이를 해당 구조물의 구속도로 사용하였다.

$$RI = RF_{free} - RF_{fix} \quad (2)$$

Fig. 9는 양단경계조건과 용접길이를 변화시키며 수행한 시리즈 해석결과를 정리하고 있다. 용접길이가 짧을수록 구속도는 커짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 동일한 용접길이(600mm)를 대상으로 양단의 경계조건을 변화시키며 수행한 해석결과를 정리하고 있다. 경계조건 변화는 양 끝단에서 고정조건을 취하는 폭의 변화, 즉 구속의 길이를 의미한다. 그림으로부터 알 수 있듯이 고정된 부분의 폭이 클수록, 즉 외부구속이 심할수록 구속도는 커짐을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 용접길이 및 구속길이일 때, 해석시에 가정하는 구속의 정도가 미치는 영향을 파악하기 위해, 유한요소해석상에서 6개의 자유도성분을 전부 구속하는 경우를 강구속, 병진자유도성분만 구속하는 경우를 중구속으로 나누어 해석을 수행하였다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 강구속의 경우가 약간 구속도가 증가하지만 구분해서 고려해야 할 정도의 차이는 나타나지 않았다.

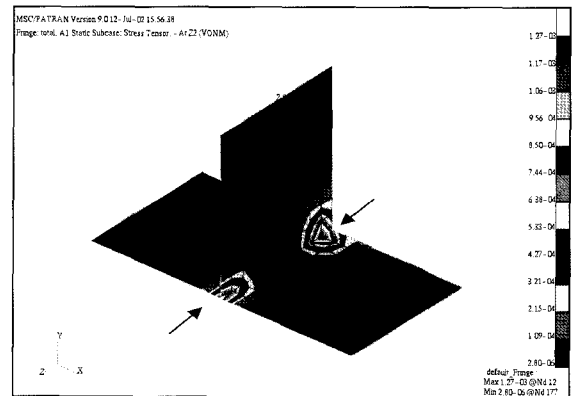


Fig. 9 Analysis model of T-joint weldment subjected to mechanical compressive loading system

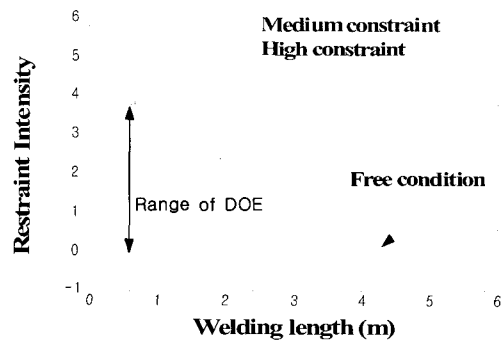


Fig. 10 Restraint intensity characteristics with respect to welding length and constraint conditions

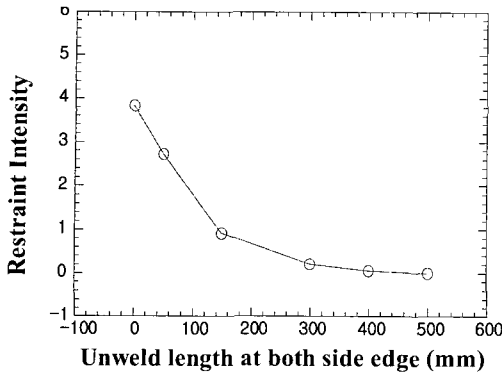


Fig. 11 Restraint intensity characteristics with respect to constraint conditions at same welding length

만약 구속도크기와 용접균열의 발생확률이 비례한다면 Fig. 9, 10으로부터 알 수 있는 구속도의 변화특징은 실제 구조물에서 관찰되는 현상과 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 용접구조물의 구속도 결정법은 간단한 방법으로 구조물의 구속효과를 표현하는데 효과적으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

3. 균열발생실험

본 연구에서는, Fig. 1과 같은 용접부 단면을 갖는 용접구조물을 용접길이와 구속조건을 달리하여 실제로 제작하고, 각종 용접조건과 관련된 균열발생특성을 조사하였다. 균일한 용접을 위해 Photo 1에서 보이듯이 “Bugotractor”를 이용한 자동 용접을 실시하였으며, 용접에 사용한 용접재료의 수소함유량도 측정하였다. Photo 2는 용접이 끝난 상태의 각 시험편을 보이고 있다.

수소량 측정에는 Gas-chromatography(AWS A4.3-93, JIS Z3118)법을 이용하였으며, 전 용접부에 걸친 초음파 탐상을 통해 균열을 측정하였다. 각 시험편에 대한 구속도는 2장에서 정의에 따라 계산하였으며, 예열온도, 수소량 등 실험결과와 함께 Table 1에 정리하고 있다. 구속도와 실제 예열온도에서 나타나는 동일조건을 반복은 실험계획법(Design of Experiment) 상 정의된 실험조건이다(Lee et al., 2002).

실측된 균열수를 전체 용접길이로 나눈 값을 균열밀도로 정의하였다. Table 1에서 알 수 있듯이, 구속도, 확산성수소, 예열온도 각각과 균열밀도는 일대일 대응관계를 나타내지 않고 있다. 이는 용접부의 균열이 다양한 용접조건들간 상호작용의 결과임을 의미하며, 이러한 현상을 표현하기 위해서는 각 용접 조건들의 적절한 조합이 필요함을 알 수 있다.

일반적으로 용착금속내부에 확산성수소의 국부적인 침적이 발생하면 재료의 취화현상을 일으키게 된다. 그리고 이 확산성수소가 최종적으로는 수소유기균열 혹은 용접부의 저온균열의 원인을 제공하므로, 균열을 발생시킬 수 있는 한계값을 넘지 않도록 철저한 습도관리를 하고 있는 실정이다.

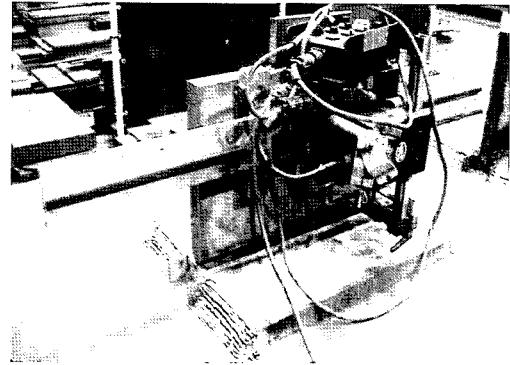


Photo 1 Test specimen and welding machine Bugotractor

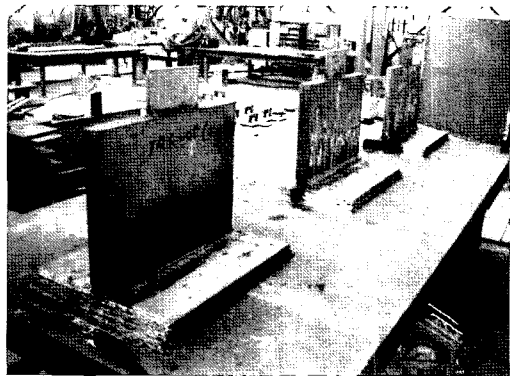


Photo 2 Photograph of test specimens with several constraint conditions

그러나 현실적으로 정확한 습도관리가 이루어지는 것이 불가능하기 때문에 적당한 예열을 통하여 균열발생방지를 위한 노력을 하고 있다. 따라서 용접재료의 수소함유량에 맞는 예열온도로 작업을 행하지 않으면 그만큼 균열발생가능성이 높아진다고 볼 수 있으며, 결국 예열온도와 확산성수소는 상호 독립적인 관계로 정의할 수는 없게 된다.

한편, 설계과정에서 구조물형상이 정해지면 그에 따라 구속도 역시 정해지게 되며 용접구조물제작에 사용하는 용접재료의 수소함유량도 주위환경에 의해 정해져 있는 상태이므로, 이들 용접조건을 토대로 균열발생을 예측하려면 2장에서 논의한 구속도에 확산성수소의 영향을 고려하여야 한다. 결론적으로 구속도는 확산성수소 및 예열온도와 상호연관관계를 갖는 형태로 정의되는 것이 가장 바람직할 것이다. 본 연구에서는, 구속도를 각 수소량에 대한 적정 예열온도의 함수로 하여 균열 발생예측인자로 사용하였다. 즉,

$$RI_H = RI \times f(T_H) \tag{3}$$

$$f(T_H) = T_{cr} / T_a \tag{4}$$

여기서, RI 는 2장에서 논의된 방법에 의해 계산된 구속도이며, $f(T_H)$ 는 예열온도의 영향을 고려하기 위한 보정계수이다. 이 보정계수는 각 수소함유량 수준에 맞는 예열온도와 실제 작업시 사용한 예열온도와의 비를 사용하였다.

Table 1 Experimental and numerical results for 12 T-joint specimens

	Diffusible Hydrogen (ml/100g)	Preheating Temperature (°C)			Restraint Intensity		Crack Density
		Measure(T_a)	Critical(T_{cr})	$f(T_H)$	Eqn. (2)	Eqn. (3)	
TRC-01	4.6	18	125	6.94	3.24	22.48	0.11
TRC-02	5.8	18	133	7.39	0.56	4.14	0.08
TIRC-03	5.1	58	130	2.24	3.24	7.26	0.03
TRC-04	6.5	58	134	2.31	0.56	1.29	0.01
TRC-05	6	38	133	3.5	3.8	13.30	-
TRC-06	7.5	38	135	3.55	0	0	0.003
TRC-07	5	10	129	12.9	1.9	24.51	0.26
TRC-08	4.9	66	131	1.98	1.9	3.76	0.0
TRC-09	6.2	38	132	3.47	1.9	6.69	0.08
TRC-10	5.6	38	133	3.5	1.9	6.65	0.07
TRC-11	5.9	38	133	3.5	1.9	6.65	-
TRC-12	5.6	38	133	3.5	1.9	6.65	0.07

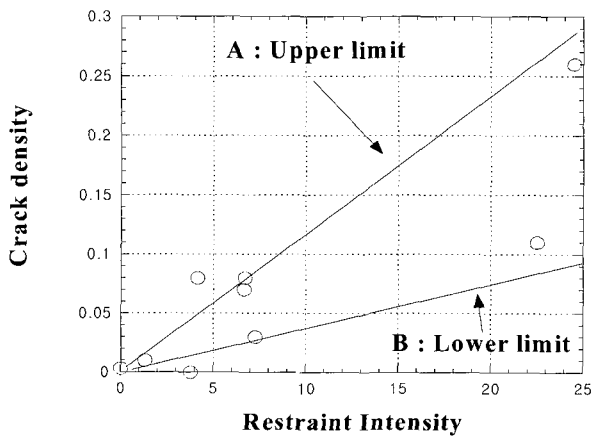


Fig. 12 Relationship between restraint intensities and crack densities for T-joint

본 연구에서는, Eqn. (4)로 표현되는 보정계수를 구하기 위해, Satoh등에 의해 조사된 용착금속의 확산성수소량에 대한 균열발생방지 예열온도를 사용하였다(Satoh et al., 1983). 실험에서 얻어진 예열온도, 확산성수소량의 측정결과 및 식 (3)을 이용하여 계산된 해당 구조물의 구속도와 균열밀도와의 관계를 Fig. 12에 나타낸다. 그림상의 A선과 B선이 해석대상 용접 구조물에서 발생할 수 있는 균열밀도의 상한과 하한을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 12에서 나타내는 A선과 B선 사이의 부분이 실험에서 사용한 작업조건에 대한 해당구조물의 균열밀도범위를 나타낸다. 따라서 예열온도 혹은 확산성수소량의 제어 등과 같은 작업조건 개선의 구체적인 방법과 양을, A 선으로부터 B선으로의 이동을 통하여 얻을 수 있으면 균열밀도를 감소시킬 수 있을 것이다.

예를 들면, 구속도와 균열밀도는 비례관계에 있으므로, 어떤 경우라 하더라도 구속도를 줄이는 것이 균열발생확률을 줄이는 것이 될 수 있다. 또한 동일한 혹은 비슷한 구속도의 경우, 즉 식 (3)에 의해 계산되는 값이 비슷한 수준이라도 실제 작업시 예열온도 및 확산성 수소량에 따른 기준온도 등은 다를 수 있다. 하지만, 이 경우에도 A에서 B선으로 이동할 수 있는 세부 조건을 변경할 수 있는 정량적인 양을 줄 수 있으며, 이 과정이 결국 균열발생확률을 줄이는 작업조건개선이 될 수 있다.

이상과 같은 방법은, 초기설계단계에서 주요 용접조건을 바탕으로 하는 균열발생의 예측 뿐만 아니라 구조물의 치수 및 제용접조건들이 어느정도 결정되어 있는 상태에서 균열발생문제를 검토하는 경우에도 아주 유용하게 사용될 것이다.

4. 결 론

용접구조물의 균열발생을 예측할 수 있는 설계지원방법개발을 목적으로 유한요소해석과 실험을 통한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 간이탄성 유한요소해석모델 개발을 통하여 용접구조물의 구속효과를 정량화시킬 수 있는 유효한 방법을 제시하였다.
- 2) 계통적인 실험을 통하여 각 용접조건과 균열발생특성간의 관계를 조사한 결과, 용접조건 각각에 대해서는 정량적인 대응관계를 확인 할 수 없었으며,
- 3) 예열온도 및 확산성수소와 제안한 구속도와와의 적절한 조합을 통하여, 주요용접조건과 균열발생특성간의 상관관계를 정량화할 수 있었다.
- 4) 본 연구에서 개발한 방법은, 수많은 불확실성을 갖는 용접 구조물 초기설계단계에서 균열발생예측에 대한 유용한 정보를 줄 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구의 일부는 한국 학술진흥재단의연구비지원(KRF-2002-003-D00459)에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

이제명, 백접기, 강성원, 김명현(2002). "유한요소해석 후처리기법을 이용한 용접부의 건전성평가", 한국해양공학회지, 제 16권, 제4호, pp 32-36.

AWS D1.1, Structural Welding Code-Steel, American Welding Society.

Engineering Science International (1998). SYSWELD+ Reference Manual, Paris/Lyon, France.

Free, A.J. and Goff, R.F.D. (1989). "Predicting Residual Stresses in Multi-pass Weldments with Finite Element Method", Computers & Structures, Vol 32, No 2, pp 365-378.

Jang, C.D. and Seo, S.I. (1995). "A Simplified Method to Estimate Longitudinal Deformations of Built-up Beams due to Welding

and Heating", Journal of Ship Research, Vol 39, No 2, pp 176-183.

Lee, J.M., Yoon, D.R., Jang T.W. and Lee, J. W (2002). "Development of a Practical Method for the Estimation of Weld Induced Crack in Thick Plate Weldments", International Welding/Joining Conference, Korea, pp 396-401.

Satoh, K, Ueda, Y. and Kihara, H. (1973). "Recent Trend of Researches on Restraint Stresses and Strains for Weld Cracking ", Journal of the Japan Welding Society, Vol 42, No 1, pp 57-72 (in Japanese).

Satoh, K., Mukai, Y. and Toyoda, M. (1983). Welding Mechanics, Rikogakusha Publishing Co. Ltd (in Japanese)

Ueda, Y., Murakawa, E., Rashwan, A.M., Okumoto, Y. and Kamichika, R. (1994). "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating", Journal of Ship Production, Vol 10, No 4, pp 239-247.

2002년 12월 17일 원고 접수

2003년 3월 3일 최종 수정본 채택