

고유변형도 기반 열변형부의 후속 하중에 기인한 용접 후 변형 해석

김종태^{†*}, 하윤석*, 장창두*

서울대학교 조선해양공학과*

Analysis of Post Weld Deformation at HAZ by External Forces Based on Inherent Strain

Jong Tae Kim^{†*}, Yun Sok Ha* and Chang Doo Jang*

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University*

Abstract

In case of welding, the inherent strains are generated, because a structure experiences the plastic yielding. The inherent strain is defined as the irrecoverable strain after removing structural restraints and loading. For the analysis method of welding distortion, equivalent loading method based on inherent strain is in general use due to its efficiency and effectiveness. However, it is generally difficult to know the final strain of the welded structure if additional loadings were applied after welding. For this reason, this study introduced the concept of the hardening and added the hardening term to the equivalent loading method based on inherent strain. Therefore, the purposes of this study are to develop the inherent strain formula considering the hardening effect and to calculate residual stresses using proposed inherent strain. Also, this study verified the availability of proposed inherent strain method by loading-unloading experiment on welded plate.

※ Keywords: Welding distortion(용접변형), Inherent strain(고유변형도), Equivalent loading method(등가하중법), Hardening(경화), Residual stress(잔류응력)

1. 서론

선박은 대형 용접 구조물로 용접이 차지하는 비중은 아주 크다. 용접은 열 또는 열과 압력에 의

해 두 금속 부재를 접합하는 방법으로 접합부에 대해 우수한 성능이나 수명을 부여한다. 하지만 금속은 열에 의한 변형, 상변태, 잔류응력 및 용접 결함을 수반하는 단점을 가지며, 특히 가열과정과 냉각과정에 따른 용접변형의 발생은 구조적으로 정밀성과 안정을 요하는 부재에 대해 그 영향력이 크다. 특히 용접부 내에 존재하는 잔류응력은 변형을 일으키는 원인임과 동시에 추가적인 하중의

접수일: 2005년 11월 22일, 승인일: 2006년 1월 9일

† 주저자, E-mail: pine7720@snu.ac.kr

Tel: 02-880-8497

부하나 제하 과정에서 재료가 탄성상태와는 다른 변형거동을 갖도록 만든다. 이에 본 연구에서는 기변형된 용접부의 추가적인 물리적 하중에 의한 변형 예측에 중점을 두고 있다.

용접변형의 예측 방법으로 널리 알려진 것 중 고유변형도 기반의 등가하중법(장창두 등 1997)은 그 정확성과 신속성으로 많이 사용된다. 고유변형도 해석법은 특정 온도변화를 경험한 영역을 고유한 잔류변형도의 발생 영역으로 가정(장창두 등 2002)하고, 그 값을 등가하중으로 치환한 후 탄성 해석으로 변형을 구하는 방법이다. 이 방법은 각 변형을 발생시키는 기구에 대한 항이 독립적으로 이루어져 있어서 급냉이 이루어지는 선상가열과 같이 상변태에 민감한 정밀변형과정에서도 그 유용성이 인정받고 있다(하운석과 장창두 2004).

본 연구에서는 이러한 고유변형도에 기반한 등가하중법을 해석의 기본기구로 하되, 이 식의 유도과정에 추가적으로 금속의 hardening을 고려하여 보다 정확한 잔류응력에 기반한 변형을 예측하려고 한다. 열영향부의 변형에만 관심을 두던 기존의 방법은 매우 빠르게 변형에 관한 결과를 도출하고는 있지만 소성영역에서의 잔류응력이 항상 항복응력이라는 가정 때문에 변형이후 추가적인 하중에 대한 거동을 평가하는 데는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 고유변형도의 전개 과정에서부터 hardening을 고려한 유도과정을 새로이 소개하고, 제안된 변형도식의 유용성을 검증할 수 있는 용접판의 하중 부하-제하 시의 판 변형측정 실험을 수행하였다. 수행된 실험은 본 연구에서 사용된 고유변형도 방법론이 적용 가능한 면외변형을 특징으로 하는 비드온 용접이다.

2. 열영향부의 고유변형도

고유변형도는 구조적인 구속이나 하중이 제거되어도 회복되지 못하는 변형도로 정의된다. 어떤 부재가 하중변화, 온도변화, 상변화 등을 겪은 상태에서 그 부재의 변형량은 탄성변형도, 소성변형도, 열변형도 및 상변태 변형도로 나타난다. 이 중 상변태 변형도는 강재를 대상으로 하는 경우 온도 변화에 따라 철의 조직이 변화하여 기본입자의 부

피를 변하게 하는 것을 부분을 등가의 변형도로 치환한 것을 일컫는다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^{th} + \epsilon^{tr} \tag{1}$$

$$\epsilon^* = \epsilon^{th} + \epsilon^p + \epsilon^{tr} = \epsilon - \epsilon^e \tag{2}$$

- where, ϵ ; Total Strain
- ϵ^e ; Elastic Strain
- ϵ^p ; Plastic Strain
- ϵ^{th} ; Thermal Strain
- ϵ^{tr} ; Phase Transformation Strain

식 (1)에서 전변형도는 탄성변형도, 소성변형도, 열변형도, 그리고 상변태변형도의 합으로 정의된다. 따라서 고유변형도는 식 (2)와 같이 열변형도와 소성변형도 및 상변태변형도의 합으로, 또는 전변형도에서 탄성변형도를 제한 값으로 정의(하운석과 장창두 2004)할 수 있다.

용접에 의해 발생하는 고유변형도를 정의하기 위하여 장창두와 이창현(2000)은 용접부를 1차원 Bar-Spring 모델(Fig. 1)로 정의하고, 2차원의 문제로 치환하는 과정에서 해당 스프링상수로 치환하는 방법을 소개하였다.

온도변화과정에서 Bar는 Spring의 구속에 의해 내부응력을 받게 된다. 이러한 과정에 의해 발생하는 bar의 최종 고유변형도의 전개는 Bar에 작용하는 Spring에 의한 외력과 그에 따른 부재 내력의 크기가 같다(식 (3))는 것에서부터 출발한다. 그에 따라 식 (2)의 후자에 따른 정의로부터 고유변형도의 결과는 식 (4)와 같다고 알려져 있다.

식 (4)와 같이 온도변화부재에 대해서도 스프링 상수로 정의해두면 Fig. 2 에 따른 식 (5)를 사용

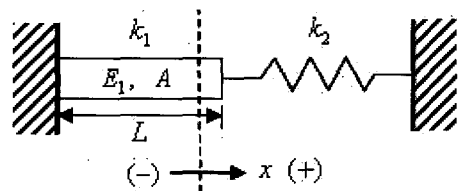


Fig. 1 One-dimensional bar-spring model

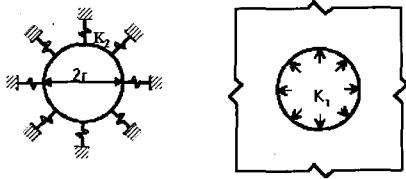


Fig. 2 Two-dimensional disk-spring model

하면 2차원에서 매우 유용한 결과(식 (6))를 얻을 수 있다.

$$k_s \cdot x = -\sigma_Y \cdot A \quad (3)$$

$$\epsilon^* = -\frac{\sigma_Y}{E_1} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right) \quad (4)$$

where, $k_1 = \frac{AE_1}{L}$
 σ_Y : Yield Stress

$$k_1 = \frac{E_1}{r(1-\nu_1)}, \quad k_2 = \frac{E_2}{r(1+\nu_2)} \quad (5)$$

$$\epsilon^* = -\frac{\sigma_Y}{E_1} \left(\frac{E_1}{E_2} \times \frac{1+\nu_1}{1-\nu_2} + 1 \right) \quad (6)$$

where, ν = Poisson's ratio

이 결과들은 식 (3)에서부터 출발한 것으로, 기본 가정이 재료의 내적 응력으로 최대한 받을 수 있는 것은 항복응력이라는 것을 내제하고 있다. 이는 재료의 hardening을 고려하지 않았다는 뜻으로서, 재료의 항복 후 구속된 상태는 Fig. 3의 응력-변형도 선도에서 실선부중 꺾인 점A로 나타낼 수 있다.

3. Hardening을 고려한 고유변형도

Fig. 4는 Fig. 3과 물리적으로 동일한 현상에 대해 단지 hardening만을 추가적으로 더 고려한 응력-변형도 선도이다. 여기서도 각 선도의 A 위

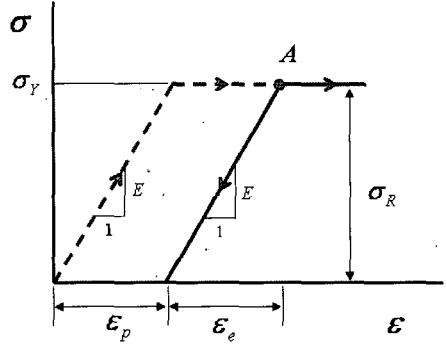


Fig. 3 Stress-strain diagram

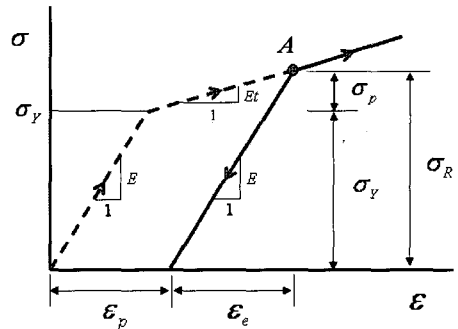


Fig. 4 Stress-strain diagram considering the hardening

치는 현재 재료의 상태를 나타내고 있다. 우선 개념적으로 Fig. 3과 대비하여 항복응력 이상의 값으로 잔류응력이 존재할 수 있다. 항복점 이상에서의 Tangent modulus(Et)는 온도의존성 재료상수인 H와 함수관계에 있으며, 선금강종과 유사한 연강(탄소 0.3% 이하)에 대해서는 Patel(1985)이 실험적으로 그 값을 제시한 바 있다. Fig. 4와 같이 가정된 hardening이 반영된 모델에서는 Fig. 1과 같은 모델링에서의 부재 내력에 항복응력을 넘어선 부분의 응력증분이 포함(식 (7))되어야 한다. 따라서 고유변형도 기반의 구속된 열영향부의 해석에서 단지 항복응력으로 표현되던 잔류응력(σR)은 항복응력과 이 응력을 넘어선 응력증분의 합으로 표시할 수 있다. 식 (2)의 마지막 고유변형도 정의를 기존과 동일하게 적용하면 식 (9)와 같되, 이 때 소성변형도는 hardening 계수를 사용하여 치환할 수 있다.

$$k_s \cdot x = -(\sigma_Y + \sigma_P) \cdot A \quad (7)$$

식 (7)에서 σ 항들은 압축 시 음(-)의 값을, 인장 시 양(+),의 값을 가진다.

$$x = -\frac{(\sigma_Y + \sigma_P) \cdot A}{k_2} \quad (8)$$

$$\epsilon^* = -\frac{\sigma_Y + \sigma_P}{E_1} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right) \quad (9)$$

$$= -\frac{\sigma_Y + H \cdot \epsilon_p}{E_1} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)$$

$$\epsilon^* = \epsilon_{th} + \epsilon_p \Rightarrow \epsilon_p = \epsilon^* - \epsilon_{th} \quad (10)$$

상변태가 없다고 가정하거나 상변태로 기인한 변형도를 열변형도 항에 반영시키면 식(2)로부터 식 (10)을 얻을 수 있다. 따라서 소성변형도 항을 식 (10)과 같이 치환하면 고유변형도를 정의하는 식은 양변에 고유변형도 항을 모두 갖게 된다(식 (11)). 이를 다시 하나로 묶어서 표현하면 최종적으로 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon^* = -\frac{\sigma_Y + H \cdot (\epsilon^* - \epsilon_{th})}{E_1} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right) \quad (11)$$

$$\epsilon^* = \frac{-\sigma_Y + H \cdot \int adT}{E_1 + H \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)} \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right) \quad (12)$$

where, $\sigma_P = H \cdot \epsilon_p$
 $\epsilon_{th} = \int adT$

H ; Hardening Coefficient(N/m²)
 a ; Thermal Coefficient(1/°C)

식 (12)를 고찰하면 hardening 계수를 '0'으로 가정할 경우, 기존의 고유변형도 전개와 동일한 표현임을 알 수 있다.

4. Hardening 계수의 결정

Hardening 계수를 결정하기 위해서 Fig. 5의 Patel(1985)의 Plastic Modulus-Temperature 선도를 이용하였다.

Plastic modulus와 Hardening coefficient의 관계식은 다음과 같다.

$$H = \frac{E \cdot Et}{E - Et} \quad (13)$$

5. 고유변형도 기반 잔류응력 평가

Hardening 현상을 반영하여 고유변형도를 제안한 앞 절의 식 (9)의 첫 번째 관계에서 두 응력항을 잔류응력으로 표현(식 (14))하고, 기 계산된 고유변형도의 계산결과(식 (12))를 다시 대입하면 잔류응력항으로 유도되는 의미있는 식을 얻을 수 있다. 이 결과인 식 (15)는 구속된 열영향부라는 특수상황 하에서의 잔류응력이다.

$$\sigma_R = \sigma_Y + \sigma_P \quad (14)$$

$$\sigma_R = \frac{E_1 \left(\sigma_Y - H \cdot \int adT \right)}{E_1 + H \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)} \quad (15)$$

6. 비드온 용접의 변형 및 하중 부하-제하 실험

본 연구에서 위에서 유도한 고유변형도 식(식 (12))과 잔류응력 식(식 (15))을 검증하기 위해 다음과 같은 용접 후 하중 부하-제하 실험을 수행하였다. 실험에 쓰인 재료는 선급에서 제시한 Mild A 강으로, 시편의 치수는 Fig. 6과 같다.

실험 방법은 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

- ① 시편의 길이 방향으로 중앙부에 비드온 용접을 수행한다.
- ② 충분히 냉각된 후 판의 횡방향 용접 각변형을 측정한다.

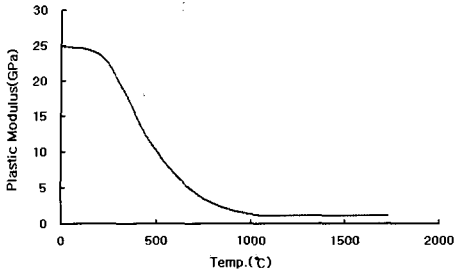


Fig. 5 Patel's plastic-temperature diagram

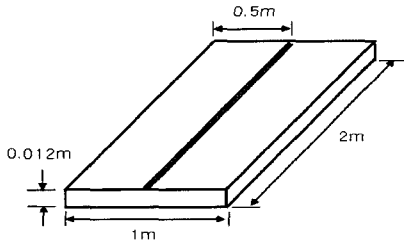


Fig. 6 Dimension of experiment structure

- ③ 판을 뒤집는다.
- ④ 하중 부하-제하 과정으로 중앙부(용접선 뒷면)에 하중(140 kgf)을 가한 후 제거한다.
- ⑤ 판의 변형을 측정한다.

4번 과정의 부하 하중은 너무 과하게 가해질 경우 하중만으로 초기응력이 없는 판에 잔류응력을 만들어 낼 수 있다. 그 경우 선하중은 약 280 kgf로 계산되며, 실험에서는 그 절반인 140 kgf의 하중을 선정하여 추를 이용해 부하되도록 실험하였다.

용접 직후의 변형은 hardening의 고려 여부와는 무관하게 기존의 변형도 제안식으로도 매우 높은 정도로 예측이 가능하다. 그러나 용접부에 추가적인 하중이 부하되었다가 다시 제하되고 난 뒤의 변형도의 증감에 대해서는, 기존의 고유변형도 정식화는 변형의 변화추이를 따라가기가 어렵다. 그것은 재료 내부의 응력을 항복응력으로 고정시키는 가정 하에서 이루어졌기에 추가적인 하중을 응력증분으로 표현할 수가 없기 때문이다. 그러나 선박의 건조는 재료의 용접 후 추가용접, 리프팅,

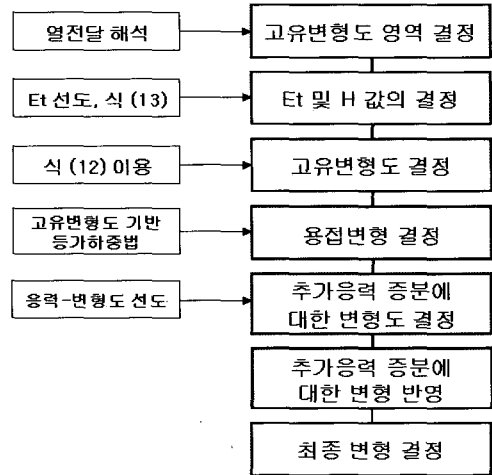


Fig. 7 Deformation analysis process

수송, 탑재 등의 과정에서 많은 하중의 이력을 겪으므로 이 실험이 그 간략한 모델이 되도록 하였다.

7. 변형해석

변형해석 과정을 Fig. 7과 같이 간략하게 나타내었다.

먼저 고유변형도 영역을 결정하기 위해서 열전도 해석을 수행하였다. 영역의 결정은 최근 연구 결과인 오스테나이트로의 상변태 시작점(하윤석과 장창두 2004)으로 잡을 것이다. Fig. 8은 열전도 해석을 위한 2차원 모델링이며, 비드온 용접이기 때문에 실험값과 같은 크기의 비드부를 모델링하였고, 여기에 초기 온도로 비드의 온도인 2300°C(이장현 등 2001)를 부여하였다.

Fig. 9의 두 그림은 각기 최고도달온도 Ac1을 고유변형도 영역으로 가정한 경우에 폭이 가장 넓은 경우(a)와 가장 깊은 경우(b)에 대한 것이다. 각 시간스텝별로 온도 분포에 대한 결과를 얻어서 종합적인 고유변형도 영역을 얻을 수 있다. 가정한 영역의 결과를 바탕으로 식 (12), (15)를 이용하여 고유변형도와 잔류응력이 계산되고, 고유변형도는 등가하중으로 치환하며, 다시 탄성해석을 통해 판의 용접변형을 구하였다(장창두 등 1997).

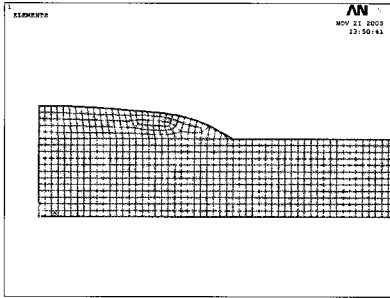
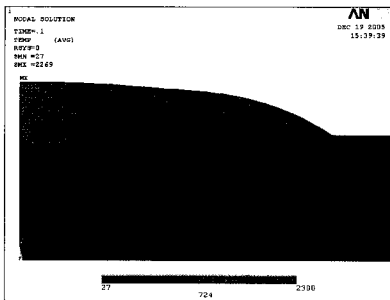
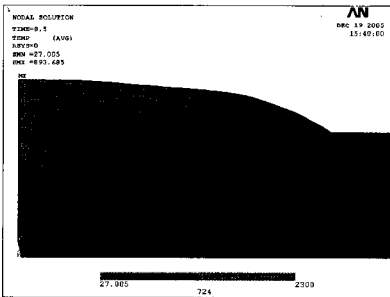


Fig. 8 The modeling for heat transfer analysis



(a)



(b)

Fig. 9 Heat transfer analysis

고유변형도 계산시에 온도변화부의 변형종료온도(장창두 등 1997)를 계산할 때에는 이 방법론이 처음 적용된 선상가열의 경우와는 다르게 용접의 특성상 비드의 면적도 고려되었다.

추가 하중에 대한 변형도의 고려는 다음과 같은 과정에 의해 적용된다. 용접 후 열영향부의 상태를 응력-변형도 선도로 나타내면 Fig. 10의 A 위치와 같다. 여기서 hardening을 고려하면 추가 하

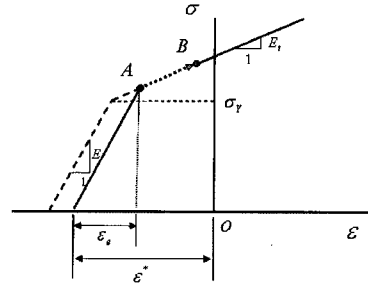


Fig. 10 Loading process

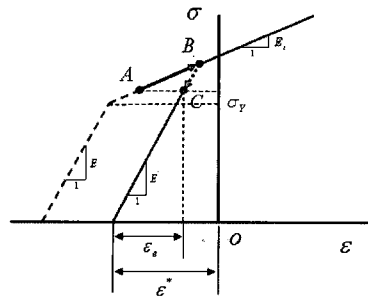


Fig. 11 Unloading process

중에 대해 응력증가분 만큼 재료의 상태가 선도 상에서 A 위치에서 B 위치로 이동하게 된다(Fig. 10). 이후 제하 시 재료의 상태는 B 위치에서 C 위치로 이동하게 되고, Fig. 11의 응력-변형도 선도에서 볼 수 있듯이 (이미 B위치에서부터) 고유변형도가 감소하게 된다.

Fig. 10과 Fig. 11과 같이 부하-제하 과정이 이루어졌을 때, 변형도는 감소했으나 잔류응력의 수준은 동일한 것을 알 수 있다. 구조적으로 안정을 요하는 부재의 경우 고유변형도와 잔류변형은 중요하게 고려될 것이다. 이와 같이 hardening을 고려한 응력-변형도 선도를 이용한다면 고유변형도가 최소의 값을 가질 수 있는 하중 조건을 계산할 수 있을 것이다.

이와 같이 추가 하중에 의해 발생하는 응력증분이 결정되면 응력-변형도 선도를 통해 변형도를 정의할 수 있다.

실험 과정에서 발생한 변형은 판의 자중의 영향이 포함된 값이다. 이에 본 변형해석에서도 판의 자중의 영향 또한 고려하였다. 우선 변형에 미치는 판의 자중을 고려하기 위해서 Fig. 12와 같이

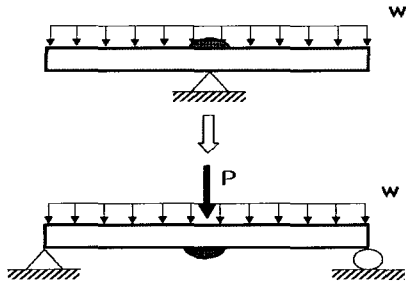


Fig. 12 Considering the effect of the plate's weight

우선 철의 비중(7.83 kgf/mm³)을 균일분포 하중으로 치환하고, 중앙부(용접선)에 작용하는 모멘트 값을 구하였다. 구한 모멘트를 식 (16)을 통해 자중에 의한 응력증가분을 결정할 수 있다. 이에 따른 변형도 결정은 위에서 언급한 방법을 따랐다.

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (16)$$

where, Z ; Section Modulus

추가 하중에 의해 발생하는 변형도를 정의하기 위해서 우선 작용하는 하중에 의해 발생하는 응력 값을 결정해야 한다. 추가 하중의 부하-제하 실험에서 부하 시 추는 용접부에 대해 선하중으로 작용하게 된다. 이 값을 용접선에 작용하는 균일분포하중으로 치환하기 위해 Fig. 13과 같이 추가 하중의 작용에 의해 발생하는 변형값과 동일한 변형을 발생시키는 균일분포하중을 구하였다.

변형도의 결정 방법은 자중에 의해 발생하는 변형도를 구하는 방법과 마찬가지로, 우선 용접부에 작용하는 모멘트를 구하고 이를 식 (16)을 통해 응력값을 결정한다. 결정된 응력값을 응력-변형도 선도를 통해 추가 하중에 의해 발생하는 변형도를 정의하게 된다. 이러한 과정을 통해 용접 및 추가 하중의 작용에 의해 발생하는 재료의 변형을 결정하였다. 또한 보다 정확한 변형해석을 위해서 재료의 물성치에 상변태를 고려하였다. 상변태가 일어는 재료의 부피변화에 관해서는 열팽창계수에 이를 반영(하윤석과 장창두 2004)하였다.

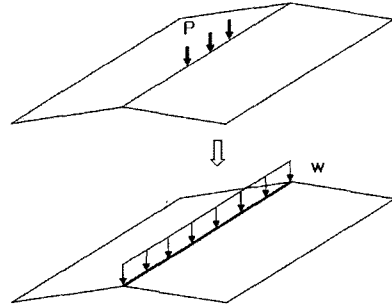


Fig. 13 Considering the effect of loading and unloading

Table 1은 실험에 의한 길이방향에 수직인 중앙부의 최대 변형 처짐과 hardening을 고려한 고유변형도를 기반으로한 등가하중법을 이용하여 얻은 최대 변형 처짐값을 비교하였다. 결과는 실험치와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 표에는 기존의 고유변형도 정식화를 통한 결과도 같이 소개하였다. 이 방법도 매우 높은 정확성으로 용접변형을 예측하긴 하였지만 그 이후의 과정이 계산될 수 없음을 보이고 있다. 추가하여 본 해석에 의해 열변형부에 남은 대략적인 잔류응력 값은 아래처럼 계산되었다. 이 값은 고유변형도 영역 내에 중앙부 판 표면을 기준으로 계산된 값이다.

$$\sigma_R = 447.2 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

Table 1 Comparing the experiment with the analysis about the maximum distortion(mm)

구 분	용접변형	하중 부하 및 제하 후 변형
실험결과 (①)	8.69	7.92
해석결과 (②) (by proposed ϵ^*)	8.51	7.67
해석결과 (③) (by conventional ϵ^*)	8.29	-
비교 (①/②)	1.02	1.03
비교 (①/③)	1.05	-

8. 결론

열변형 해석의 유용한 도구인 고유변형도 정식화에 hardening을 고려하여 정식화를 개선하였다. 이로써 아래와 같은 효과를 거둘 수 있었다.

1. 고유변형도를 기반으로 한 잔류응력의 평가를 항복응력 이상의 수준에 대해서도 내릴 수 있게 되었다.
2. 이미 열이력을 겪은 부재에 대하여 추가적인 하중의 부하나 제하가 있게 될 경우 그 이력을 따르는 변형해석이 고유변형도 기반으로 가능하게 되었다.
3. 이러한 과정들은 모두 용접 실험 및 이후의 하중 부하-제하 실험 결과와 비교되어 그 효용성을 검증되었다.
4. 변형된 열영향부가 포함된 재료의 리프팅 시 자중에 의해 그 경감이 가능한 방향을 예측하여 작업을 진행할 수 있는 가능성을 열었다.

후 기

본 연구는 NRL(국가지정실험실) 연구지원으로 인하여 수행되었기에 그 후원에 감사드립니다.

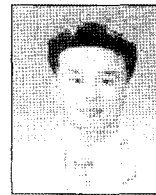
참 고 문 헌

- 이장현, 우종훈, 임채환, 신중계, 2001, "ANSYS를 이용한 다층용접 시뮬레이션," ANSYS User's Conference.

- 장창두, 서승일, 고대은, 1997, "간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측을 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 3호, pp. 104-112.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 2호, pp. 127-136.
- 장창두, 하윤석, 고대은, 문성춘, 2002, "선상가열 판변형 해석을 위한 고유변형도 영역의 결정법," 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 1호, pp. 82-89.
- 하윤석, 장창두, 2004, "선상가열시 강의 상변태를 고려한 개선된 고유변형도 기반의 등가하중법," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 6호, pp. 65-74.
- Patel, B., 1985, Thermo-Elasto-Plastic Finite Element Formulation for Deformation and Residual Stresses Due to Welds, Ph. D Thesis, Carleton Univ., Ottawa, Ontario, Canada.



< 김 종 태 >



< 하 윤 석 >



< 장 창 두 >