

용접변형 예측 및 가시화 프로그램 개발

서승일*·노재규**·이정수**

*한국철도기술연구원

**한진중공업 산업기술연구소

Development of a Program for Prediction and Visualization of Welding Deformations

Seung Il Seo*, Jae Gyu Noh** and Jung Soo Lee**

*Korea Railroad Research Institute, Anyang 431-080, Korea

**Technical Research Institute, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd, Busan 606-796, Korea

Abstract

To prevent problems caused by welding deformation, preparation in the design stage is necessary. Countermeasures in the design stage is also the most cost-effective method. In this study, to give designers information on the welding deformation, a system to visualize the welding deformation is developed. The model to visualize the deformation is the stiffened plate common in steel structures. To increase computational efficiency, theoretical solutions to calculate the deformation of plate and stiffener are used instead of numerical analysis. Also, to secure accuracy, experiments to estimate bending moment causing welding deformations are performed. A computer program written with Visual C++ is developed for interactive data input, calculation of welding deformation and display of deformed shape. Designers can change the design in the early stage after checking the deformed shape by this system.

(Received May 13, 2002)

Key Words : Welding deformation, Stiffened plate, Visualization, Theoretical solution

1. 서 론

선박이나 해양구조물 등과 같은 강구조물에 있어서 심각한 용접변형은 사용 성능 상의 측면에서 허용되지 않는다. 보통 용접변형의 허용기준은 표준으로 정해 있는데¹⁾, 대부분의 조선소와 같은 강구조물 제작 공장은 용접변형 검사를 위한 자체적인 품질기준도 가지고 있다²⁾. 검사 도중에 발견한 과도한 용접변형은 교정이 불가피한데, 제작 초기에 발견하게 되면 적은 비용으로 변형 교정이 가능할 수 있으나, 구조물의 완성 단계에서 과도한 용접변형을 발견하게 되면 교정을 위해 엄청난 비용을 투입해야 하는 문제가 발생한다. 구조물 내부의 의장공사가 진척된 상황에서 용접변형을 교정하기 위해서는 의장공사를 철거하거나, 도장 작업을 재실시해야 하는 문제가 발생하여 공정에 막대한 지장을 초래하기도 한다. 이러한 용접변형을 교정하기 위한 비용의 문제는 생산을 담당하는 부서만의 문제가 아니라 공장

전체의 문제가 된다. 이러한 이유로 인해 설계단계에서 용접변형의 문제를 해결할 수 있는 방법을 찾는 것이 비용 측면에서 효과적이다. 설계단계에서 용접변형을 시뮬레이션해 보고, 이를 토대로 간단한 구조 보강을 통해 사전에 용접변형 문제 발생을 막을 수 있다면, 약간의 재료비 상승으로 생산단계에서의 막대한 손실 비용을 절감할 수 있어서 훨씬 효과적이고 경제적이다.

본 연구에서는 이러한 용접변형 문제에 대한 초기 대처와 용이한 해결법을 제시하기 위해서 용접변형을 예측하고 이를 가시화 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 용접변형을 시뮬레이션 함으로써 설계 단계에서 정확하고 가시적으로 변형을 예측할 수 있으며 초기에 변형 대처를 위한 방법을 찾아낼 수 있다.

용접변형의 예측에 관해서는 많은 공학자들에 의해 연구가 이루어 왔으며 최근에는 실제 3차원구조물의 용접변형을 예측할 수 있는 실용적인 방법도 제시되고 있다³⁾. 이러한 방법은 유한요소법을 이용하고 있는데 이

방법은 모델링, 요소생성 및 해석의 단계를 기본으로 하고 있다. 하지만 설계단계에서 전형적인 구조물의 용접변형을 예측하고 가시화하기 위해서는 좀 더 효율적이고 특화된 도구적 방법이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 이론적 해석에 기초한 시뮬레이션 방법을 제시하고 이를 강구조물의 전형적인 부분구조인 보강된 판에 적용하고자 하였다.

2. 보강판 변형의 이론적 해석

2.1 판굽힘 변형 해석

용접변형은 횡수축변형, 종수축변형, 회전변형, 각변형, 횡굽힘변형과 좌굴변형으로 나눌 수 있다. 구조물을 제작하기 위하여 용접작업을 수행하면 이러한 여러 종류의 변형이 복합적으로 발생하여 하나의 용접변형을 구성하게 된다. 선박이나 해양구조물의 갑판, 격벽 및 외판의 보강된 판구조물에 있어서 보강재 용접에 의한 각변형 및 종굽힘변형에 따른 면외변형은 판구조물의 용접에서 상당한 영향을 끼치는 요인이므로 검사관에 의해서 자주 지적되는 사항이다. 또한 이러한 변형은 판구조물의 좌굴강도를 저하시키는 요인이기도 하다. 따라서 보강된 판 구조물의 제작 후에 나타나는 면외변형을 본 연구에서는 다루고자 한다.

대부분의 보강된 판은 편평하고 사각형상인 패널(panel)과 보(beam)로 구성되어 있는데, 이러한 정형화된 구조물의 굽힘변형은 이론적으로 해석이 가능하다⁴⁾. 이론에 근거한 해석은 데이터 입력과 모델링이 필요한 수치계산에 비해 신속성과 정확성 등의 측면에서 이점이 있다.

본 연구에서 사용되어진 전형적인 보강판은 Fig. 1에 나타나 있다. 면외변형을 일으키는 잔류소성변형도(고유변형도)를 적분하면 등가모멘트가 얻어지는데, 변형 예측의 정확도는 등가모멘트의 정확도에 의존하고 있으므로 등가모멘트 계산의 정확성 확보가 중요하다. 본

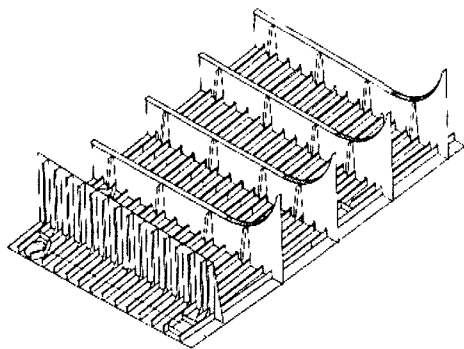


Fig. 1 Typical stiffened plate

연구에서는 등가모멘트 계산의 정확도를 유지하기 위해서 실험결과를 적용하는 방법을 사용하였다. 고전적 탄성이론에 근거한 해석을 수행하기 위해서 보강판을 단순지지된 사각형의 판과 유효폭을 가지는 보강재로 구분하였고, 용접 변형을 판의 가장자리와 보강재의 양단에 굽힘모멘트가 작용하여 유발된 면외변형으로 이상화하였다.

이와 같은 조건의 판의 해를 구하기 위하여 Fig. 2에서 나타내고 있는 판 경계에서의 모멘트 하중에 의한 단순지지 조건의 판 변형에 관한 각각의 해를 중첩하여 최종적인 각변형에 의한 굽힘 변형을 구한다. 해당하는 각 해석조건에서의 굽힘 변형중 기본적인 변형식의 상세한 표현식은 식(1)처럼 나타낼 수 있다.

$$w_0 = -\frac{a^2}{4\pi^2 D} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{E_{m0} \sin \frac{m\pi y}{a}}{m^2} \left[\frac{1}{\cosh \alpha_m} \left(\alpha_m \tanh \alpha_m \cosh \frac{m\pi y}{a} - \frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} \right) + \frac{1}{\sinh \alpha_m} \left(\alpha_m \coth \alpha_m \sinh \frac{m\pi y}{a} - \frac{m\pi y}{a} \cosh \frac{m\pi y}{a} \right) \right] \quad (1)$$

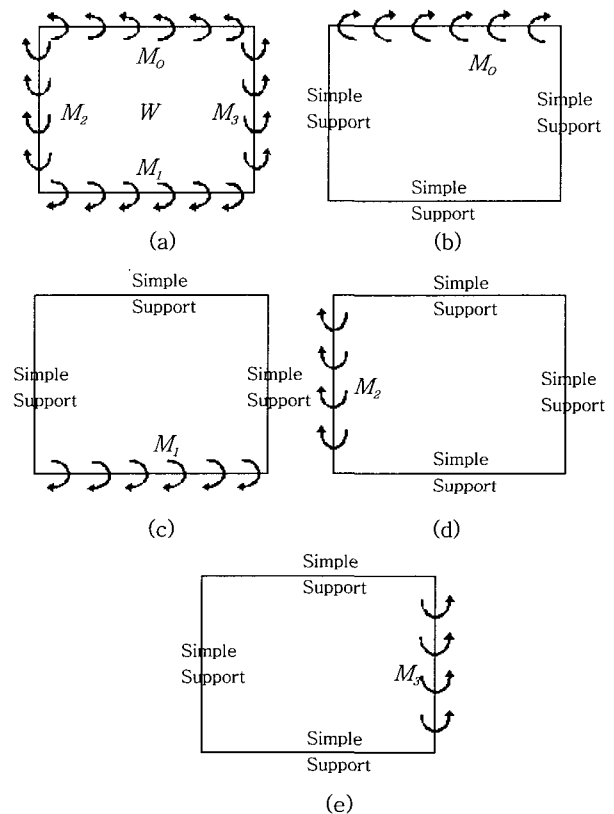


Fig. 2 Decomposition of plate bending moments

여기서, $E_{m0} = \frac{4M_0}{m\pi}$

$$\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

b = 판의 짧은 변의 길이

a = 판의 긴 변의 길이

h = 판두께

M_0, M_1, M_2, M_3 = 각 변의 모멘트

나머지 변형식은 (1)식의 변환을 통하여 구할 수 있다. Fig. 3에 보이는 판의 변형은 판굽힘이론에 근거한 각 변형에 대한 면의변형을 형상화한 것이다.

(1)식은 판재의 변형이 판 두께보다 작다는 가정 하에 미소변형 이론을 적용하여 얻어진 식이며, 대변형은 고려하지 않은 식이다. 또한 판재의 면내 하중에 의한 좌굴변형과 국부적인 잔류응력은 고려되지 않았다.

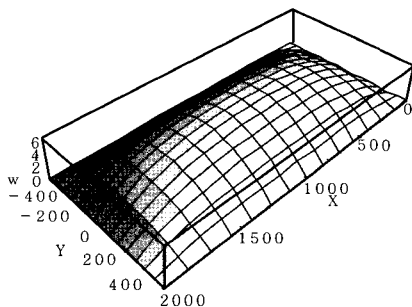


Fig. 3 Combined deformation of a simply supported plate under 4 edge moments

2.2 보강재의 종굽힘변형

보강재에서 단면중심과 수축력 작용점의 편심에 의한 수축모멘트에 의해서 종굽힘변형이 발생한다. 판에 보강재를 용접하게 되면 유효폭을 고려한 보의 단면중심과 용접선이 일치하지 않기 때문에 용접선을 따라 작용하는 수축력이 종굽힘 모멘트를 발생하게 되는 것이다. 연속적인 내부 종굽힘 모멘트는 서로 상쇄되어 사라지므로 결과에 영향을 미치는 종굽힘 모멘트는 결국 양 끝단에서 작용하는 모멘트가 된다. 따라서 양끝단에 동일한 모멘트가 작용하는 경우의 보의 변형을 계산함으로써 용접에 의한 종굽힘 변형을 예측할 수 있다⁵⁾.

그런데 보강재는 격자형태로 판에 용접되어져 제작되므로 보강재 상호간의 영향을 고려할 수 있는 방법을 사용하여야 한다⁶⁾. 이를 위하여 횡보강재와 종보강재의

교차점을 중심으로 2개의 모드를 구성하고 각 교차점에서 지지반력을 계산하여 이를 전체 보강재의 종굽힘 변형 계산에 사용한다. 개방형 단면을 가지는 보강재의 비틀림강도는 전체결과에 미치는 영향이 미미하므로 격자형 보강재의 상호간섭 효과 계산에서 제외하여도 변형결과에는 큰 영향이 없다.

이러한 방법에 의해서 교차점에서의 적합조건을 고려하여 계산되어진 각 보강재의 교차점에서의 지지반력을 나타내보면 Fig. 4에 나타난 것과 같다.

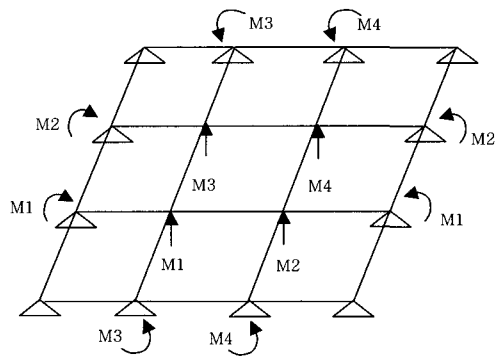


Fig. 4 A simply supported grillage under end moments

모멘트에 의한 측면력에 의한 단순지지 보의 변형은 다음의 식(2)를 이용하여 계산할 수 있고 이러한 측면력에 의한 보의 변형을 영향계수를 이용함으로써 해석 범위 내의 보의 변형을 나타낼 수 있다. 먼저 Fig. 5에 보이는 것처럼 격자구조 교차점에서의 처짐량을 적합조건으로 하여 수평방향으로 작용하는 모멘트에 의한 교차점에서의 지지반력을 구하고 이를 이용하여 수평모멘트에 의한 교차점에서의 처짐량을 구하고, 수직방향으로 작용하는 모멘트에 의한 교차점에서의 지지반력을 구하여 수직모멘트에 의한 교차점에서의 처짐량을 구하고, 전체적으로 교차점에서의 처짐량을 수평, 수직방향에 따른 처짐량의 중첩으로 구한다. 이러한 일련의 과정을 모든 교차점에 대해서 적용하여 전체 판에서의 굽힘모멘트에 의한 격자 보강재의 처짐량을 계산하게 된다. 양단 모멘트에 의한 임의 위치에서의 보강재의 처짐은 다음식으로 구할 수 있다.

$$d(x) = \frac{M_1}{2EI} x(L-x) \tag{2}$$

여기서 $d(x)$ = 보강재의 처짐

M_1 = 용접 수축 종굽힘 모멘트

I = 유효폭 포함 보강재의 단면 2차모멘트

L = 보강재의 길이

이처럼 교차점 각각에 대해서 식을 구성하면 다음과

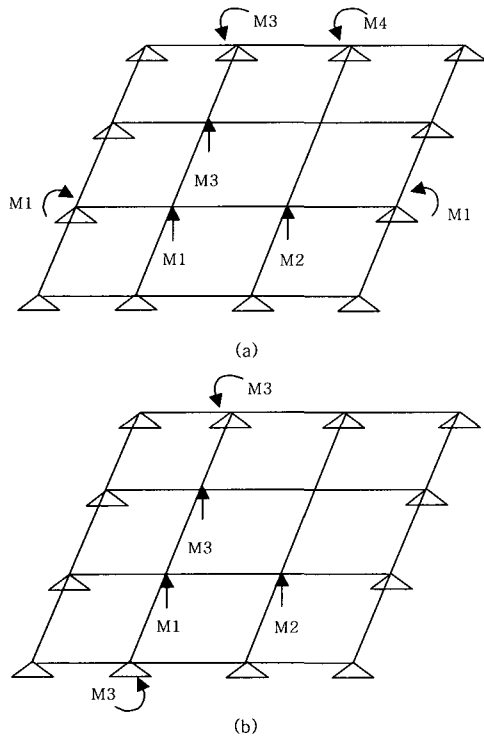


Fig. 5 Decomposition of end moments for calculation of reaction forces

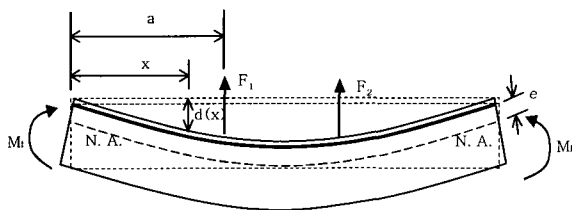


Fig. 6 Loads acting on a stiffener

같은 선형방정식의 형태를 구성하게 되고 이를 풀면 지지반력을 구할 수 있으며 이를 이용하여 각 교차점에서의 처짐량을 구할 수 있다.

$$\{v\} = [d] \{F\} \tag{3}$$

여기서, $\{v\}$ = 교차점에서의 변형
 $[d]$ = 영향계수
 $\{F\}$ = 교차점에서의 반력

용접에 의한 보의 종굽힘모멘트는 다음식으로 추정할 수 있다⁵⁾.

$$M_1 = f_1 \frac{\alpha}{\rho c} Q e \tag{4}$$

여기서, f_1 = 종수축모멘트 수정 계수

- α = 선팽창계수
- ρ = 재료의 밀도
- c = 재료의 비열
- Q = 단위 길이당 입열량
- e = 보의 단면 중립축에서 용접선까지의 거리

교차점의 처짐량을 포함하여 보강재의 변형이 계산되면 판모델 내부의 임의의 지점에서의 처짐량은 내삽법을 사용하여 구한다. 보강재 변형량은 다항식으로써 내삽이 가능한 형태이므로 Lagrange 다항식을 사용한 내삽법을 이용하여 판 내부 임의의 지점에서의 처짐량을 구한다.

2.3 등가모멘트 예측

각변형을 일으키는 모멘트는 용접부 주위의 고유변형도로부터 계산할 수 있다³⁾. 사용되어진 계산법에서의 여러 인자와 계수는 생산 현장에서 사용하고 있는 용접 환경 하에서의 실험결과를 사용하여 보정하였다. 단위 길이당 등가 모멘트는 다음식과 같이 표현된다.

$$M_0 = f_2 Q h \tag{5}$$

여기서, f_2 = 수축모멘트 수정 계수
 h = 판두께

등가모멘트를 구하기 위해서 비드용접과 필렛용접을 사용하여 실험을 수행하였다. 용접비드 주변의 재료연화부분은 실온에서의 탄성계수의 1/25의 값을 가진다고 가정한다³⁾. Fig. 7에 보이듯이 자동 용접을 사용하여 연강판에서 실험을 수행하였으며 제반 용접조건은 Fig. 8에 보이는 컴퓨터모니터링 시스템을 사용하여 기록하였다.

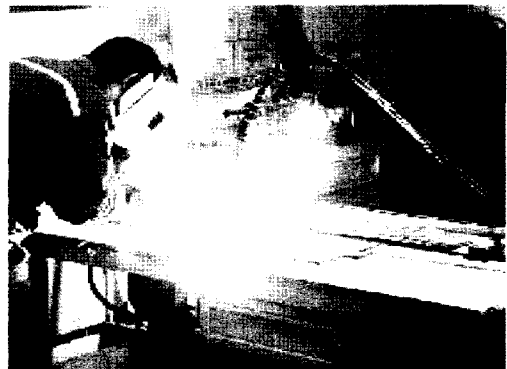


Fig. 7 Automatic CO₂ welding on a specimen

Fig. 9는 비드용접과 필렛용접 실험에서 사용한 시편 들이며, 실험결과는 Fig. 10에 나타난 것처럼 고안된 디지털 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. Fig. 11은 측정된 시편을 가시화하여 나타낸 것이다.



Fig. 8 Welding monitoring system

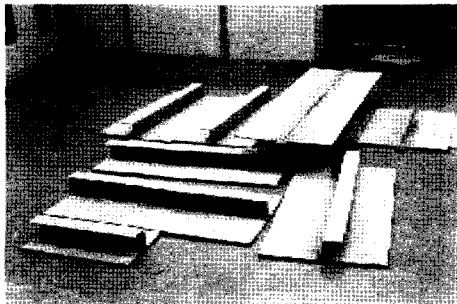


Fig. 9 Various welding specimens

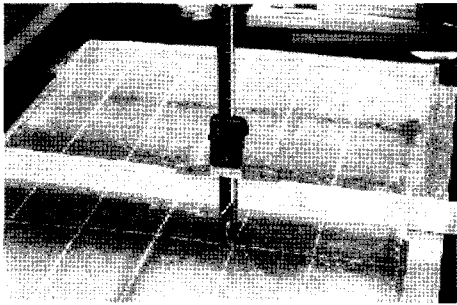


Fig. 10 Measurement of welding deformation

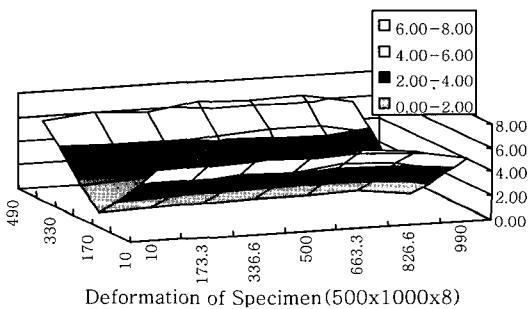


Fig. 11 Deformed shape of a specimen after bead-on-welding

3. 보강판 구조의 용접 변형 예측

3.1 구속상태의 판의 각변형

보강판은 판과 보강재의 조합 구조물이므로 판의 변형과 보강재의 변형을 중첩시켜서 최종 용접변형을 예측하게 된다. 그런데 보강판의 경우에는 인접 부재에 의한 구속 효과가 발생하여 변형량이 감소된다. 구속효과에 의한 각변형은 渡辺 등의 제안식⁷⁾을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\delta_o = \frac{1}{1+\beta C} \delta_r \tag{6}$$

$$C = \frac{1}{a} \left\{ 1.5 + 1.975 \left(\frac{a}{b} \right)^2 + 0.927 \left(\frac{a}{b} \right)^4 \right\} \tag{7}$$

여기서, δ_o = 구속된 판의 각변형

δ_r = 자유 상태의 판의 각변형

C = 구속계수

a = 판의 작은 변의 길이

b = 판의 긴 변의 길이

β = 37.5 cm

판의 자유상태에서 등가 굽힘모멘트를 계산하여 각변형을 구한 후에 (6)식에 의해 구속상태의 각변형을 구하고 최대 각변형이 (6)식과 같아지는 등가 모멘트를 (1)식으로 구하여 판 전체의 변형을 계산하게 된다.

3.2 실험을 통한 계산 결과의 검증

Fig. 12와 같이 간단한 보강판을 용접으로 조립하고 Fig. 10과 같은 방법으로 변형을 계측하여 앞에서 언급한 해석결과와 비교해 보면 Fig. 13 및 Fig. 14와 같은 결과가 얻어진다. Fig. 12시편의 크기는 800×1200이고 판두께는 6mm, 8mm, 10mm의 3종류이



Fig. 12 Specimens of welded stiffened plates

다. 대표적인 용접 조건은 다음 Table 1과 같으며, 보강재와 판의 결합부에 필릿 용접을 수행하였다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 6mm판의 중앙 부분에서 용접 변형 계측 및 계산 결과이다.

Table 1 Welding condition for stiffened plate

Welding process	CO ₂ Automatic welding
Welding current(A)	107
Welding voltage(V)	29
Speed(mm/min)	424
Leg length(mm)	4.5

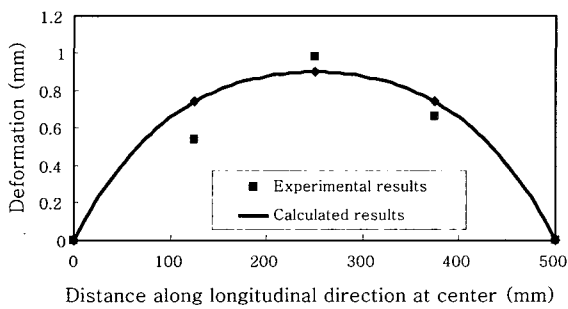


Fig. 13 Deformation of typical panel along longitudinal direction at center

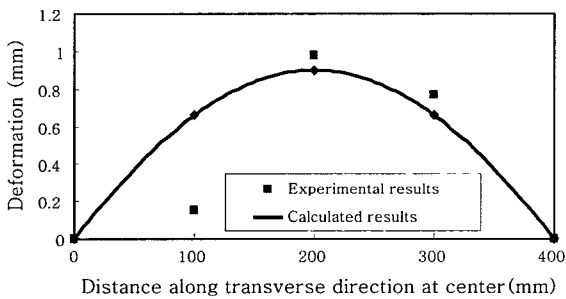


Fig. 14 Deformation of typical panel along transverse direction at center

4. 프로그래밍

프로그래밍은 크게 3부분으로 나뉘어져 있다. 모델링을 수행할 수 있는 모델링 모듈(pre-processor), 유도된 공식을 사용하여 변형량 계산을 수행하는 계산 모듈 그리고 계산되어진 결과를 사용자가 확인할 수 있는 후처리 모듈(post-processor)로 이루어진다. 여기서 모델링 모듈과 계산 모듈은 동일한 응용 프로그램속에서 구현되어지며 후처리 모듈은 또 다른 하나의 독립 응용 프로그램으로 구현되어진다. 응용프로그램의 구현은 PC상에서 Win32를 기반으로 운영될 수 있도록 하였다. 각각의 구성모듈의 기능과 구현 내용을 기술하면 다음과 같다.

4.1 모델링 모듈

모델링 모듈의 주요기능은 사용자로부터 계산에 필요한 제반 정보를 입력 받아 계산에 필요한 정보로 변환시켜주는 것이다.

이러한 제반 정보로는 전체 해석에 사용되어질 판 관련 정보, 보강재 관련 정보, 용접 관련 정보, 구속조건으로 나눌 수 있다. Fig. 15는 이러한 모델링 모듈의 초기화면이고 Fig. 16은 모델링을 위한 입력창이다.

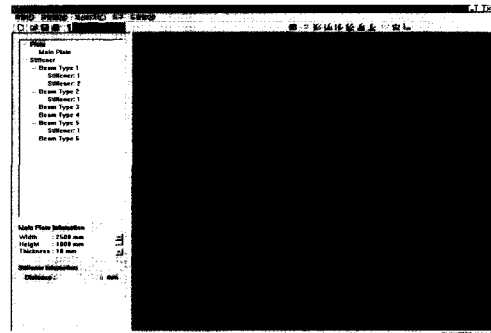
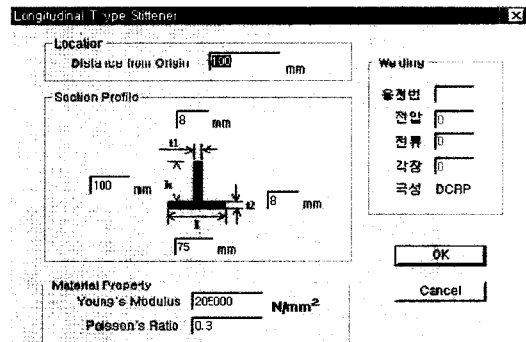
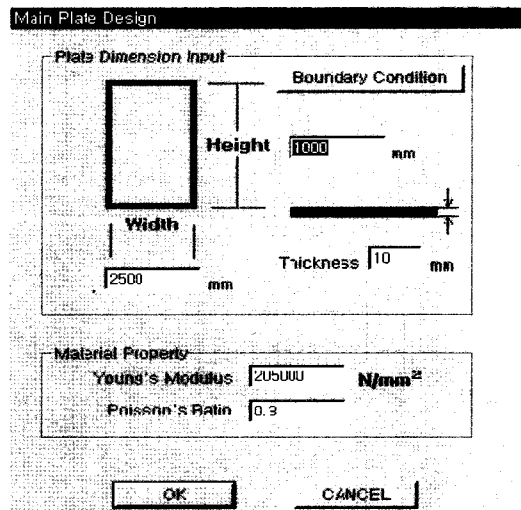


Fig. 15 Configuration of modeling module



(a)



(b)

Fig. 16 Input dialog boxes for modeling

4.2 계산 모듈

모델링이 완성되고 나면 계산을 수행 할 수 있다. 메뉴의 계산하기를 선택하고 계산시작의 부메뉴를 선택하면 계산에 사용할 메쉬 분할개수를 입력하는 대화상자가 나타난다. 여기서 원하는 분할개수를 입력하고 OK 버튼을 누르면 계산을 시작한다.

구해진 변형량은 작업하고 있는 디렉토리에 변형결과로서 저장하게 된다. 이렇게 저장된 결과 파일은 이후 후처리 모듈에 의해서 읽어 들여진다.

4.3 후처리 모듈

후처리 모듈은 독립된 응용프로그램으로 구성되어 있다. 이 프로그램은 계산에 의한 결과 파일을 읽어 들여서 해석하고자 하는 각각의 판에 있어서의 최대 용접변형 값과 최소 용접변형 값을 리스트창의 형식으로 표현해 주는 기능을 가지고 있다. 또한 결과를 Line, Solid, Contour의 3가지 형식으로 디스플레이할 수 있다. Line 또는 Solid를 이용하여 그래픽 표현을 신속히 구현할 수 있게 하였고, Contour기능을 사용하여 최대 변형과 최소 변형을 색의 차이로써 손쉽게 구분하게 하였다. Fig. 17는 이러한 후처리 프로그램에서 실행한 결과를 나타내고 있다.

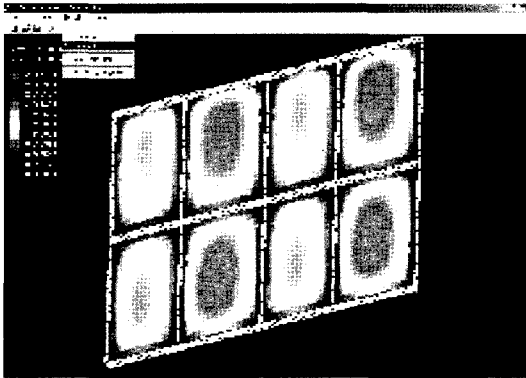


Fig. 17 Contour display of calculated results

5. 결 론

본 논문에서는 현장 용접환경에 가장 적합한 형태의 결론을 도출하고자 현장에서 사용하고 있는 기기를 이용하여 실험을 수행하였으며 이를 바탕으로 고유변형도 이론에 기초한 등가모멘트를 도출해 내어 변형을 계산하는 방법을 사용하였다. 탄성 판굽힘 변형 이론을 적용하였고, 격자형 보강재의 처짐 계산 시에 효율적인 방법을 적용하였으며, Lagrange 내삽법을 이용하여 Window환경에서 반복적인 계산 결과를 신속하게 그래픽과 표를 이용하여 출력할 수 있도록 변형 해석 및 가시화 전용 프로그램으로 개발하였다. 또한 실험결과를 통해 계산 결과를 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Permissible Unfairness in Steel Welded Structures, NAVSHIPS 0900-060-4010, U.S. Navy(1968)
2. Hanjin Shipbuilding Quality Standard, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd(2001)
3. Seo, S. I. and Jang, C. D. : A Study on the Prediction of Deformations of Welded Ship Structures, Journal of Ship Production, 15-2 (1999)
4. Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S. : Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill (1970)
5. Jang, C. D. and Seo, S. I. : A Simplified Method to Estimate Longitudinal Deformations of Built-up Beams Due to Welding and Heating, Journal of Ship Research, 39-2(1995)
6. Seo, S. I. and Lim, S. J. : Development of a Rigid-ended Beam Element and Its Application for Simplifying Analysis of Bracketed Frame Structures, Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, 34-3(1997)(in Korea)
7. 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 溶接力學と その 応用, 朝倉書店(1965) (in Japanese)