대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 45 권 제 1 호 2008 년 2 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 45, No. 1, pp. 93-100, February 2008
DOI: 10.3744/SNAK.2008.45.1.93

고유변형도를 경계조건으로 갖는 대형 각(殼) 구조물 열변형 해석법 개발

하윤석

삼성중공업 산업기술연구소 용접연구파트

Development of Thermal Distortion Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition

Yunsok Ha

Welding Research Part, SAMSUNG HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.

Abstract

There are two ways of conventional thermal distortion analysis. One is the thermal elasto-plastic analysis and the other is the equivalent forces method based on inherent strain. The former needs exorbitant analysis time, while the latter cannot obtain results of stress field and it needs much time consumption with loads modeling on curved plates. Such faults in two methods have made difficulties in thermal distortion analysis of a large structure like ship hull. In order to solve them, new kind of thermal distortion analysis method was developed. We devised that the inherent strains was used as direct input factors in forms of boundary conditions. It was embodied by using thermal expansion coefficient in commercial code. We used the pre-calculated inherent strain as thermal expansion coefficient, and endowed nodes with imaginary temperatures. This method was already adopted at hull block welding distortion analysis which was considered as impossible, and gave productive results such as reduction of work time in the dry dock.

※Keywords : Inherent strain(고유변형도), FEM (유한 요소 해석법), Equivalent forces method(등가하중법), Thermal elasto-plastic method(열탄소성 해석법), Shell element(각요소), Thermal expansion coefficient(열팽창계수)

접수일: 2007 년 7 월 9 일, 승인일: 2008 년 1 월 23 일

†교신저자: mcryu@dsme.co.kr, 055-680-5567

1. 서 론

용접은 반드시 열변형을 수반하기 때문에, 관리만으로 고정도의 품질을 유지하려면 간접생산비가 매우 증가한다. 따라서 열변형을 해석해낼 수 있다는 것은 역변형, 보강, 공정변경 등의 방법으로 용접 품질을 해결할 수 있다는 것을 의미한다. 최근에는 선박건조의 속도가 매우 빨라짐에 따라, 열변형 해석이 가능해야 한다는 요구에 덧붙여, 그것이 매우 빨리 수행될 수 있어야 하며, 하나의 해석이 여러 가지 결과를 도출할 수 있어야 한다는 것이 추가로 요구되고 있다. 또한 도크 내 작업의 생산성을 위하여, 선수미 대형 곡블록의 탑재단계까지 용접변형 해석이 요구되는데, 현재 수준의 열변형 해석방법론은 수행에 있어서 효율이 상당히 낮다.

2. 열변형 해석법의 분류

열변형을 해석하는 문제는 상용코드를 이용하여 전통적으로 다음과 같은 두 가지 방법으로 이루어져 왔다. 첫 번째 방법은 열량을 입력인자로 갖는 가장 오랜 전통을 가지고 있는 열탄소성 해석법이다. 이 방법은 3 차원 솔리드 요소를 사용하며 열전도 방정식과 온도차에 의한 열변형도로부터 탄소성 해석이 이루어진다. 선박 건조에 있어서는 곡가공을 위한 변형 해석에 많이 활용(Lee and Shin 2002)되었다. 최근에는 냉각시 상변태 분화까지 고려하여 변형을 계산해 주는 상용코드(ESI Group 2006)도 있다. 사용자는 단지 FEM 모델링과 용접시(또는 가열시) 이루어지는 열량을 입력할 뿐이며, 해석 결과는 변형/응력 모두를 도출해 준다. 그러나 3 차원 요소의 사용은 대형 구조물의 모델링이 어려울 뿐 아니라, 이 방법은 일반 시편 정도에서도 원하는 정확도에 따라 시간~일 단위의 해석시간이 필요하다.

또 다른 방법은 90 년대 이후 사용된 등가하중법(Ko et al. 1997)이다. 이 방법은 단순 시편의 실험변형량(Lee et al. 1994)으로부터, 혹은 열이력이 가해진 부재에 내재한 고유변형도의 계산으로부터 열영향부에 대하여 등가 하중을 적분해내는 것이 핵심이다. 일단 하중이 도출되면 해석에 걸리는 시간은 일반 구조해석과 같아지며, 실제 Jang and Lee(2000)는 선박 조립공정에서 중조블록 수준의 평블록을 순서까지 고려해 변형해석을 하는데 성공한 바 있다. 등가하중이 고유변형도로부터 적분되어 만들어지는 경우는 추가적인 장점이 존재한다. FEM 으로는 등가하중으로부터 변형도출과의 단순 해석만을 맡기고, 상변태, 하드닝 등 기타 정밀한 변형량 도출을 위한 부분들은 고유변형도 계산과정에 일임하여, 전산기 자원을 최소화시키면서도 열변형 해석을 수행할 수 있는 것이다. 최근에 고유변형도 단계에서 반영이 가능한 사안들은 선상가열(Jang et al. 2002)/삼각가열(Jang et al. 2001) 등 용접과는 다른 형태의 가열과정을 포함, 상변태(Ha and Jang 2004, Ha and Jang 2007), 냉각 방법(Ha et al. 2005), 하드닝(Kim et al. 2006, Ha et al. 2007) 등이 있다.

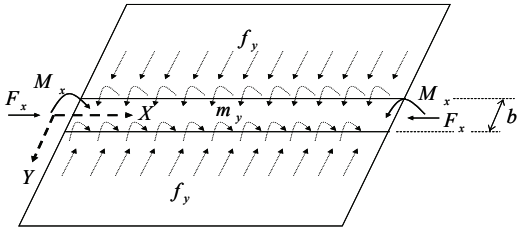

Fig. 1 Equivalent Forces adopted in analysis model

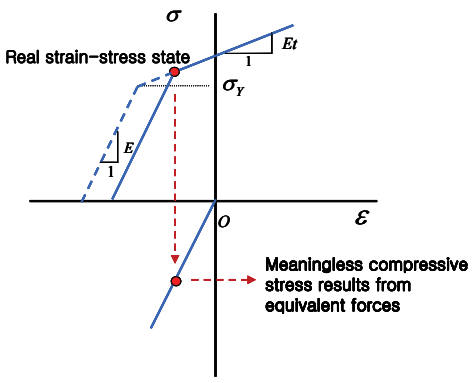

Fig. 2 Meaningless compressive stress results from equivalent forces

그런데, 등가하중법이 선체블록과 같은 대형 쉘 구조물의 용접변형에 적용되는 데에는 걸림돌이 크게 두 가지가 있다. 첫째는 입력인자인 하중이 벡터라는 것이다. 전통적인 열탄소성 해석은 입력인자가 열량, 즉 에너지이므로 스칼라 물리량이다. 이 차이는 구조물이 평블록인 경우는 없는 것과 같으나, 용접선이 3 차원 상에서 곡을 따라가는 곡블록을 다룰 때는 문제가 되기 시작한다. Fig. 1 에 등장하는 등가하중들을 3 차원 곡선 상의 모든 절점에서 벡터분해하여 일일이 모델링에 적용하는 과정이 힘들고, 그렇게 해서 대입한 하중들은 곡면 상에서 서로의 총합이 ‘ 0’ 을 만들어내지 못하여(Kang 2006) 강체운동을 일으킨다. 즉, 이 문제점들은 처리한다는 것은, 해석자가 하중을 모델링하는 데에 있어서 등가하중법이 열탄소성 해석 대신 채택됨으로써 줄어들게 된 전산기 계산 그 이상의 시간이 요구된다는 것과 같다.

둘째, 대형 구조물은 중력효과를 무시하고 해석되기 어렵다. 그런데 등가하중법이란 Fig. 2 와 같이 수축변형을 만들어내는 등가의 가상 압축하중에 의해 용접부 일대 압축응력이라는 무의미한 응력장을 만들어낸다. 따라서 응력분포를 얻기 위한 어떤 구조해석과도 연성되어 계산되지 못한다.

즉, 등가하중법은 쉘 구조물, 대형 구조물에 있어서 범용적인 사용에 한계가 있을 수 있다. 그러나, 등가하중의 근원이 되는 고유변형도는 10 년 이상의 관련 연구 역량이 결집된 모체로서, 새로운 열변형 해석법은 이를 살리면서도 구조물이 실제 용접과 같이 내적으로 스스로 수축하는 것을 모사하여야 한다.

3. 수축변형 해석

본 연구는 앞서 지적한 것과 같이 고유변형도의 개념을 그대로 살리면서도 FEM 사용시 입력인자는 스칼라가 되도록 하며 정상적인 응력장이 도출되는 해석기구를 고안하는 것을 목표로 하였다. 이에 주목한 것은 재료 물성치인 열팽창계수이다. 열팽창계수는 모델링 절점에 부여된 온도와 만나서 모델링을 국부적으로 팽창/수축시킬 수 있는 도구로 활용할 수 있다. 따라서 고유변형도를 가상의 재료물성치(열팽창계수)로 삼고, 용접선상에 존재하는 절점에 가상의 온도 1℃ 혹은 0℃를 마치 On/Off 의 개념처럼 부여한다면 등가하중을 가했을 때와 동일한 변형을 얻을 수 있으면서도 입력이 매우 쉽고, 용접부 인장응력을 자동으로 도출할 수 있는 기구가 될 수 있다.

이 방법은 요소분할 정책에서는 등가하중법과 차이를 보이도록 고안하였다. Fig 3 의 하단에 있는 그림과 같이 등가하중법이 열영향부 양끝에서 하중이 가해지는 반면, 제안하는 방법은 용접부 중심에 절점이 위치해야 한다. 단 요소의 크기는 제안하는 해석법을 원칙적으로 사용하였을 때 두 방법 모두 열영향부의 크기가 되므로 차이는 없다.

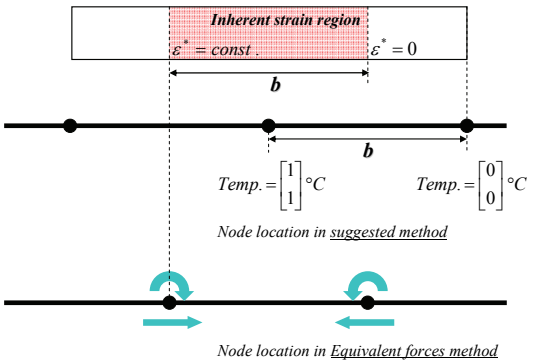

Fig. 3 Element size standard in new analysis

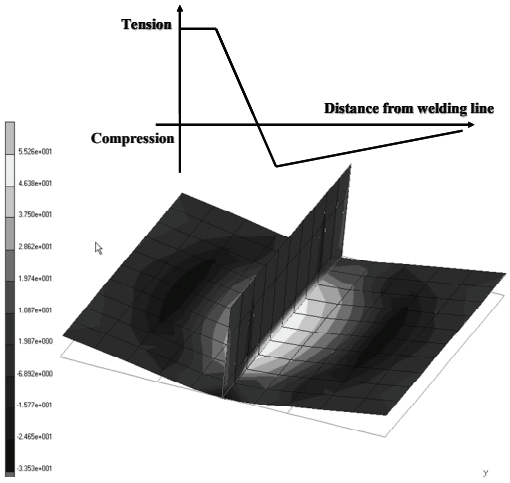

Fig. 4 Stress results of developed method

Fig. 4 를 통해, 필렛 용접의 변형을 해석한 결과를 나타내었다. 변형 형상(수축 양상 및 굽힘 양상)은 기존에 이미 알려진 방향과 동일하게 나온 것을 확인할 수 있으며(해석시간은 등가하중법과 동일), 주목할 것은 명암으로 나타낸 응력결과이다. 용접선 길이방향으로의 응력이, Fig. 4 의 상단에 도시한 일반적으로 알려진 용접부로부터 판 끝단까지의 경향과 매우 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 각변형 해석

용접변형은 냉각과정 중의 수축이 주요한 원인이며, 그 수축량의 판두께 방향으로의 편차 혹은 주변의 구조물과의 구속관계 등에 의해 육안으로는 여러 가지 모드로 보인다. 따라서 본 절에서 언급하고 있는 각변형도 변형의 근본 원리는 같다. 지금까지 설명된 것은 Fig. 3 과 같이 열영향부의 단면이 직사각형인 이상적인 수축변형에 대한 것이었다. 실제 이러한 경우는 거의 없으므로 선박 구조물은 늘 국부적 각변형(보강재 내에서의 요철변형)을 갖게 된다. 용접의 경우 하나의 용접선에 있어서 각장의 모습은 거의 동일하고, 대부분의 상용 FEM 코드는 쉘 요소 절점에서 top/bottom 의 온도를 따로 지원한다는 사실을 활용하여, 본 연구는 가상의 절점온도를 이용하여 각변형을 모사할 수 있도록 만들었다.

$$\begin{cases} F = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \varepsilon^* \cdot E \cdot b(z)\, dz \\ M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \varepsilon^* \cdot E \cdot b(z) \cdot z\, dz \end{cases} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \quad \alpha = \varepsilon^*, \quad T = \begin{cases} T_{top} = \dfrac{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b(z) \times (1 - \frac{4}{h} \times z)\, dz}{b \times h} \\ T_{bottom} = \dfrac{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b(z) \times (1 + \frac{4}{h} \times z)\, dz}{b \times h} \end{cases}$$

Where, ε^*: 고유변형도
E : 탄성계수
z : 중립축으로부터의 두께방향 좌표
F : 용접부 수축에 대한 등가하중
M : 용접부 수축에 대한 등가모멘트
α : FEM 모델링의 등가 열팽창계수
T_{top} : 절점에서의 가상의 상부 온도
T_{bottom} : 절점에서의 가상의 하부 온도

일단 맞대기 용접이라면 열영향부 전체가 갇힐 수 있는 가상의 최소 직사각형 공간을 가정하고, 이것을 기준으로 요소분할이 이루어진다(Fig. 3). 또한 그러한 경우에 대하여 가상의 절점 온도는 상부와 하부에 각 식 (1)을 따르는 것으로 하였다.

식 (1) 및 Fig. 5 는 본 논문에서 제시한 해석법의 입력값의 원칙을 등가하중법과 대비시켜 기술한 것이다. 등가하중법에서 하중을 기술하는 적분항(Ko et al. 1997) 부분에 있던 고유변형도는 제시되는 해석법에서는 가상의 물성치(열팽창계수)로 설정되어 반영되었고, 탄성계수는 모델링에 반영되어 있다. 마지막으로 열영향부 영역의 깊이에 따른 폭함수 b(z)는 제시된 방법에서도 여전히 적분을 통해 의미를 갖는다. 등가하중법에서의 폭함수는 그냥 적분된 경우 등가의 수축력을 나타내고, 깊이 위치를 나타내는 변수 z 와 한번 더 곱을 이룬 후 적분되어 등가수축모멘트를 나타낸다. 제시된 방법에서는 상면의 입력온도와 하면의 입력온도의 평균값이 수축을 나타내고 그 차이가 굽힘을 나타내도록 되어 있다. 식 (1)은 상하면의 온도기술부분을 더하였을 때, 직관적으로 열변형부 폭의 두께방향으로의 구배와 관련된 z 항이 사라지게 되어 있다. 본 연구가 제시한대로 고유변형도를 가상의 열팽창계수로 구현할 때, 쉘요소 절점의 상하온도를 어떻게 정하는 것에 대한 기하학적인 개념은 Masubuchi(1980)의 Inherent shrinkage 의 정의와 동일하다.

식 (1)을 Fig.3 과 같은 가상의 직사각단면의 열영향부에 대해 계산했을 때, Fig. 3 내에 제시된 것

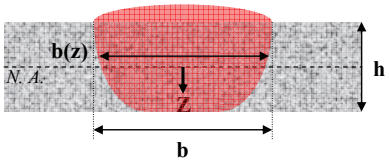

Fig. 5 Arbitrary section of butt-welded plate

처럼 상/하면의 온도는 ‘ 1’ 이 된다. 물론 이것은 등가의 열팽창계수를 고유변형도로 그대로 치환하였을 경우에 대한 것이며, 용접부 수축은 제시된 방법 내에서 열챙창계수와 온도의 곱에 의하여 이루어지므로 해석 편의에 따라 두 인자를 동시에 변경하여 사용될 수 있다.

Fig. 6 과 식 (2)를 통해 대표적으로 가정되는 함수가 있는 경우들에 대해서 열영향부 폭함수를 제시한다. 이는 시험편 절단 등을 통해 더 정밀한 수학적 모델을 찾는 것이 가능하다. Fig. 6 내에서 i)는 여성(reinforcement), ii)는 맞대기 용접 혹은 삼각가열(Jang et al. 2005), iii)는 필렛용접 그리고 iv)는 선상가열이나 비드온 용접/필렛 용접 모재부의 열영향부에 대략적으로 대응된다. 필렛용접 해석 시에는 web 부분의 요소에 열수축 기능을 해제하면 상/하면이 열전달에 대해 대칭인 웹부재에 대하여 오류 없이 Flange 의 각변형을 계산할 수 있다.

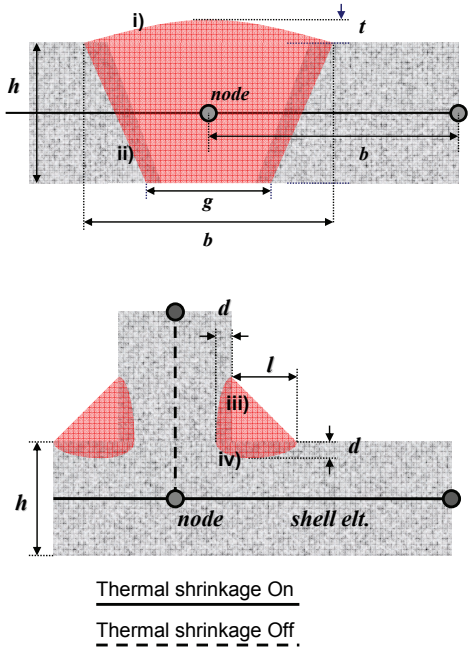

Fig. 6 Sections of butt/fillet-welded plates for introducing width of inherent strain region

$$b(z) =$$

$$i)\quad \frac{b}{2t}\sqrt{t^2-(z+\frac{h}{2})^2} \quad (-\frac{h}{2}-t \le z \le -\frac{h}{2}) \qquad (2)$$

$$ii)\quad \frac{g-b}{h}\times z+\frac{g+b}{2} \quad (-\frac{h}{2} \le z \le \frac{h}{2})$$

$$iii)\quad \frac{d}{l}\sqrt{l^2-(z+\frac{h}{2})^2}+(z+l+\frac{h}{2}) \quad (-\frac{h}{2}-l \le z \le -\frac{h}{2})$$

$$iv)\quad \frac{b}{d}\sqrt{d^2-(z+\frac{h}{2})^2} \quad (-\frac{h}{2} \le z \le -\frac{h}{2}+d)$$

Fig. 7 과 Fig. 8 은 지금까지 제시한 방법들을 블록내 용접선에 적용한 블록 단위의 해석 예들을 보여주고 있다. Fig. 7 은 보강재 간격이 일반 선박의 70% 수준으로 좁게 설계된 선수부의 곡중조 블록으로서, 일반 블록보다 단위면적당 30% 이상의 용접장을 갖기에 용접변형이 일반 블록 보다 과할 것으로 예상되어 내부재간, 그리고 전체 뒤틀림을 방지하기 위한 구속 포인트를 찾기 위해 수행되었다. 그림에 보이는 모든 조인트는 본 연구에서 제시된 방법으로 용접부 수축이 가해지고 있으며, 해석은 초단위로 이루어졌다.

Fig. 8 은 전형적인 엔진룸 블록의 갑판부 모습이다. 엔진룸 갑판은 다른 외판에 비해 상대적으로 얇아서 보강재간 과대 변형이 알려져 있기에 갑판부는 보강재 뒷면(갑판면)에서 자주 곡직된다. 제시된 그림은 갑판 위에 또 다른 블록이 얹힌 후 용접이 되었을 때 갑판의 변형을 보여주고 있다. 이 해석은 상세설계 이전에 선행되어 갑판 하면의 보강재 위치 결정에 사용될 수 있다.

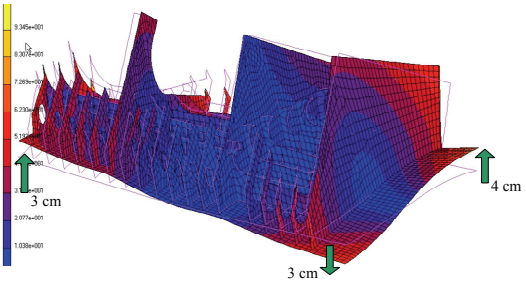

Fig. 7 Example of welding deformation analysis of a F block using proposed method

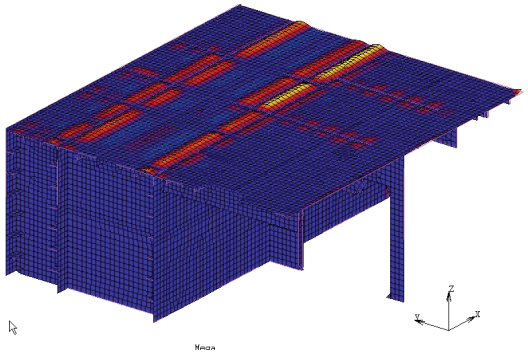

Fig. 8 Example of welding deformation analysis of a E block using proposed method

Table 1 Comparison among thermal distortion analyses

ITEM	3D Thermal elasto-plastic analysis	Equivalent forces method	Proposed method
Basic input parameter	Heat flux	Force	strain
Geometric Modeling, Mesh, and B. C. Modeling Time	5	100 (standard)	2
Computing Time	100 hr. (Standard)	30 seconds	30 seconds
Stress results	O	X	O
Convergence	Bad	Normal (Standard)	Good
Reflection of phase transformation	Difficult	Easy	Easy

Table 1 은 본 연구가 제안하는 열전달 해석법과 기존 방법간의 효율성 비교를 제시한 표이다. 표를 구성하는 항목들은 모델링에 따라 그 절대비율이 매우 달라질 수 있다. 따라서 제시한 표는 일반적인 열탄소성 해석이 약 4 일의 연산시간을 소비한 특정 컴퓨팅 환경에서 다른 두 해석의 효율을 비교한 것이다.

정확한 열변형량의 도출은 해석법이 결정하는 것이 아니라 입력값의 정확성이 결정한다고 가정되었으므로, Table 1 의 주요 비교 항목은 소요시간과 같이 사용자가 얼마나 편하고 쉽게 해석할 수 있는가로 정하였다.

5. 봉요소를 활용한 자유요소분할

단순 구조 해석도 요소수가 많아지면 해석시간의 증가에 대해 자유롭지 못하다. Fig. 3 이 주는 결론의 일부는 열영향부의 최대폭으로 모델링의 요소를 분할하라는 것이다. 대부분의 용접에서 폭의 넓이가 50mm 를 넘는 경우는 거의 없으므로, 이 정도의 요소 크기는 블록 단위의 모델을 해석해야 하는 해석자에게는 매우 부담이 된다. 또한 건조되는 선박은 미리 전선구조설계가 이루어지는데 이 모델을 재사용하지 못하고 용접열변형을 위해 새로 모델링을 해야 한다면 이것도 큰 부담이 될 수 있다. 따라서 본 해석법은 요소분할에 자유도를 높이기 위하여 용접선 쉘 요소를 따라가는 봉요소를 사용하는 기법을 추가로 제시하려고 한다.

요소의 크기가 자유로워지면, 해석법이 권고하고 있는 크기의 요소를 사용하였을 때에 비례하여 횡수축 변형량과 면외 횡굽힘 변형량이 늘어난다.

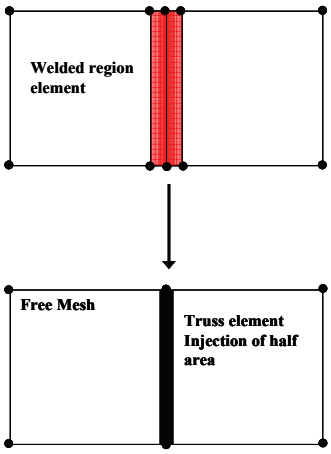

Fig. 9 Truss element injection to shell element to compensate longitudinal insufficient inherent strain

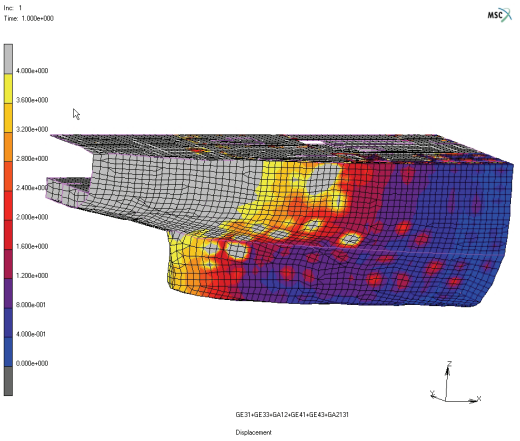

Fig. 10 Deformation results of after body of ship structure using proposed analysis method

따라서 이 두 모드에 대해서는 열팽창계수라는 요소 물성치로 대입한 고유변형도를 요소크기비로 나누어서 대입하면 해결이 된다. 그러나 큰 모델에서 전체적인 뒤틀림을 모사하는 종수축은 그 수축량이 모자라게 된다. 이를 해결하기 위하여 자체 굽힘 강성은 없으면서 HAZ 의 단면적을 갖는 봉(Truss)요소를 모델링의 용접선 내에 결합(Fig. 9)시키면 이 부분을 해결할 수 있다. 용접선은 절점과 각(shell)요소의 edge 로 구성되어 있을 것이므로, edge 를 1 차원 요소로 변환시키는 상용코드의 전처리 기능으로 본 기술을 쉽게 적용할 수 있다.

Fig. 10 은 도크 내에서 선미 대형 블록의 용접에 따른 축계변형 해석 결과를 보여 주고 있다. 이는 역대 이루어진 용접 해석 중 가장 큰 규모의 모델링과 가장 긴 용접장을 지닌 경우에 해당하나, 모델링은 전선 구조 해석에 사용되던 것을 활용하였고 전산기 연산 시간은 분 단위에서 이루어졌다.

6. 결 언

합리적인 열변형 해석을 위하여 사용하던 등가하중법 내에서 가상의 하중을 결정하던 고유변형도를 가상의 물성치로 대체하여 내적 수축을 이끌어내는 FEM 코드의 사용법을 개발하였다. 이에 하중의 모델링이 대형 곡블록에도 매우 쉽게 적용되었다. 대표적인 용접 개선 형상에 대해서는 적용 공식을 제시하였고, 블록에 대한 해석 예들을 소개하였으며, 요소 분할에 자유로울 수 있는 기술도 같이 개발되었다.

참 고 문 헌

- ESI Group, 2006, SYSWORLD® 2006 Release Notes, ESI Group, 75761 PARIS CEDEX 16.
- Ha, Y.S. and Jang, C.D., 2007, "An Improved Inherent Strain Analysis for Plate Bending by Line Heating Considering Phase Transformation of Steel," International Journal of Offshore and Polar Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 139-144.
- Ha, Y.S. and Jang, C.D., 2004, " Development of Inherent Strain Method Considering Phase Transformation of Mild Steel in Line Heating," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 6, pp. 65-74.
- Ha, Y.S., Jang, C.D., Kim, J.T. and Mun, H.S., 2007, "Analysis of Post-Weld Deformation at the Heat-Affected Zone Using External Forces Based on the Inherent Strain," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 8, No. 4, pp. 56-62.
- Ha, Y.S., Kim, J.S. and Jang, C.D., 2005, " Prediction of Plate Deformation Considering Film Boiling in Water Cooling Process after Line Heating, " Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 5, pp. 462-468.
- Jang, C.D., Ha, Y.S., Ko, D.E. and Moon, S.C, 2002, " Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 82-89.
- Jang, C.D., Kim, T.H., Ko, D.E., Lamb, T. and Ha, Y.S., 2005, "Prediction of steel plate deformation due to triangle heating using the inherent strain method," Journal of Marine Science Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 211-216.
- Jang, C.D., Ko, D.E., Moon, S.C. and Seo, Y.R.,

2001, “ Simulation of Plate Deformation by Triangle Heating Process, ” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, pp. 66-74.

- Jang, C.D. and Lee, C.H, 2000, “ A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 2, pp. 127-136.
- Kang, S.S., 2006, Analysis Method Development for Welding Deformation in Curved Block, SHI-ASERC No. 2006-24-01, Pusan.
- Kim, J.T., Ha, Y.S. and Jang, C.D., 2006, “ Analysis of Post Weld Deformation at HAZ by External Forces Based on Inherent Strain, ” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 6, pp. 220-227.
- Ko, D.E., Jang, C.D., Seo, S.I. and Lee, H.W., 1997, “ Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 116-127.
- Lee, J.H. and Shin, J.G., 2002, “ Relations between Input Parameters and Residual Deformation in Line Heating process using Finite Element Analysis and Multi-Variable Analysis,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 2, pp. 69-80.
- Lee, J.S., Kim, S.I. and Oh, S.J., 1994, “ Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method (I),” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 139-146.
- Masubuchi, K., 1980, Analysis of Welded Structures, Massachusetts Institute of Technology, Pergamon Press, Oxford OX3 0BW.

< 하 윤 석 >