

## 자중과 용접변형을 고려한 평블록 조립 시뮬레이션

노재규\*, 신종계\*\*

### An Assembly Simulation of a Plane Block with Gravity and Welding Deformations

by

Jae Gyou Roh\*, and Jong Gye Shin\*\*

#### 요 약

완성되어진 블록을 이용한 탑재의 과정에서 발생하는 블록 경계간의 판재 겹쳐짐 현상, 과도한 간격 및 단차의 발생현상은 선박의 건조비용과 공수를 증가시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 블록의 조립 및 탑재에 관한 시뮬레이션 시스템을 제안하고 이중 조립에 관한 시뮬레이션을 용접순서에 따라 용접변형 및 자중을 고려하여 유한요소해석을 ANSYS를 이용하여 수행하였다. 용접에 의한 변형은 실험에 의한 변형량을 이용한 등가강성에 따른 등가 하중을 사용하여 탄성적인 해석법을 수행하여 예측하였으며 선체 이중저 평블록을 패널 조립법에 근거한 조립순서에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통한 변형으로부터 조립순서에 따른 중간 제품의 형상의 변화에 의한 강성의 변화에 기인한 변형량의 차이를 확인 할 수 있었으며, 자중의 효과를 반드시 고려하여야 함을 확인 할 수 있었다.

#### Abstract

Overlap, excessive wide gaps, and errors between blocks during erection process increases cost and man-hour.

In this paper, a system to simulate the assembly process is suggested and a plane block assembly of welding deformation with gravity is simulated in consideration of assembly order. deformations and errors occurring in the cutting and forming processes are not considered and welding deformations are acquired by equivalent stiffness and load method from experiments and hull double bottom

접수일자 : 1999년 3월 20일, 재접수일자 : 1999년 5월 25일

\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 대학원

\*\* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

plane block is assembled on a assembly order by panel method. It is certified that according to the order of assembly, intermediate product shape affects rigidity which affects welding deformations. Assembly order must be considered in the assembly process. It is certified that the gravity has important role in the assembly process.

1. 서론

국내 조선업의 생산성 향상은 절실하게 요구되고 있다. 이러한 생산성 향상은 크게 관리기술과 생산기술로 나누어 추진될 수 있다. 관리기술에는 자금, 인사, 자재, 일정 등의 관리 기술이 있는데 그 동안 조선 생산성은 관리기술의 발전에 힘입어 향상되어 왔다. 그러나, 이러한 관리기술만으로는 진정한 조선생산성을 균형 있고 발전적으로 향상시킬 수 없다. 새로운 생산기술을 바탕으로 관리기술이 적용되어야 생산성을 더욱 높일 수 있게 될 것이다.

조선에 있어서 생산은 생산 설계, 절단, 가공, 조립, 탑재, 도장 공정으로 이루어진다. 각 공정에 따른 생산성향상이 곧바로 전체 선박 건조에 있어서의 생산성향상으로 이어진다. 절단공정을 통하여 생성된 부재는 가공이 필요한 경우에는 가공의 과정을 거쳐서 조립공정으로 옮겨가며, 조립공정은 각 조선소의 설비에 따라 소조립, 중조립(또는 선행 대조립), 대조립의 공정을 거쳐 선행탑재(pre-erection) 또는 탑재공정으로 연결된다.

선박 부재의 취부(tacking) 및 용접 작업은 조립 및 탑재 공정의 대부분을 차지하고 있고, 선박 부재의 취부 및 용접 작업의 생산성은 전체 선박 건조의 생산성에 큰 영향을 미친다. 따라서, 조립 및 탑재공정의 생산기술 향상은 전체 선박생산과정에 매우 중요하다고 할 수 있다.

아래의 Fig.1에 대표적인 선박 블록의 일부 조립 구조물인 평블록을 보이고 있다.

이러한 조립구조물은 절단과 가공의 과정을 거쳐서 취부 되어진 후 용접의 방법을 통해서 조립되어진다. 특히 조립과정에서는 조립을 위한 부재의 절단과[1][2] 가공에 따른 오차와 취부에 의한 위치 오차가 발생하게 되고, turn over와 같은 기계적 운반 작업에 의한 변형이 발생하기도 하며[3], 용

접선의 형태가 복잡하여 많은 수작업을 필요로 하는 동시에 용접에 의해서 필연적으로 발생하는 변형을 부분적으로 제거하면서 각 부재들을 접합해 가므로, 최종 조립구조물은 굽힘과 수축과 같은 작업 오차 즉 변형을 지니게 된다. 따라서 블록조립후의 변형

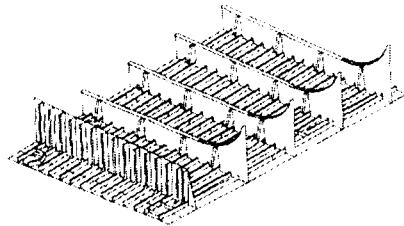


Fig. 1 An example of welded structure

은 절단과 가공으로 인한 오차와 자중 또는 운반에 따른 기계적 변형 그리고 취부에 따른 위치 오차 및 용접 작업으로 인한 열변형이 복합적으로 작용하여 나타나는 현상이므로 변형이 최소화될 수 있는 작업 조건의 산출이 필요하다.

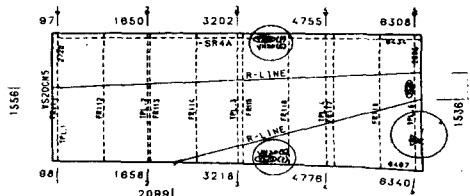


Fig. 2 A draft for cutting process

이와 같은 블록 조립구조물을 이용한 탑재의 공정에서 발생하는 wide gap에 의한 블록 경계의 부정합을 피하기 위해서 절단 공정 중에 위의 Fig. 2에 보이듯이 미리 블록 상호간의 경계 부재에 해당하는 부분에 마진을 주고 있다. 절단과 가공의 공정 및 자중 또는 운반에 따른 변형과 용접작업에서 발

생하는 오차로 인하여 블록의 조립 과정에서 누적되어진 변형량은 탑재의 공정에서 wide gap을 유발한다. 이러한 wide gap이 발생할 경우에는 교정작업으로 인한 공수의 증가와 더불어 선체 구조 강도상의 문제점을 자연스럽게 지니게 된다[8]. 또한 마진으로 인한 블록의 탑재 시 블록경계에서 판재의 겹쳐짐(lap) 현상과 용접에 의한 변형이 발생하고 있으며 이를 제거하기 위해서 절단작업과 교정작업을 수행하고 있다[3]. 이러한 탑재 시 절단작업과 교정작업은 공수의 증가를 초래하고 열에 의한 잔류응력을 남기게 된다. 따라서 조립 및 탑재의 과정에서 필연적으로 발생하게 되는 변형을 제어하는 정도 제어(accuracy management)가 가장 중요한 생산 기술의 문제이다.

본 논문에서는 조립 및 탑재시뮬레이션 시스템의 한 예를 제시하고 이에 기초하여 평블록의 조립에 따른 변형을 예측하고자 한다. 먼저, 절단과 가공에 의한 작업 오차가 없다고 가정하여 블록의 조립 과정에서 생기는 용접에 의한 변형 현상을 구하기 위해서 블록의 일부에 대해 등가강성에 기초한 등가하중을 이용하는 탄성적 용접변형 해석 방법을 적용하였고[5] 이와 함께 자중을 고려하여 상용 해석프로그램인 ANSYS를 이용한 유한요소해석을 통해 시뮬레이션한 후 그 결과를 이용하여 평블록 조립 과정에서 발생하는 변형량을 예측하여 그 결과를 정도관리에 활용할 수 있는 자료로써 활용하고자 한다.

## 2. 조립 및 탑재의 정도관리시스템

조립 및 탑재의 정도관리 시스템은 선박 블록의 조립 및 탑재과정에서 발생하는 변형과 정보를 예측하는 시뮬레이션을 이용하여 선체 부재들의 생산과 조립 과정에서 작업공수를 최소화하고 탑재 공정에서의 변형을 고려하여 최적의 탑재방법을 시스템이 판단하는 것이다. 이 시스템 중에서 블록의 생산과 정에서 발생하는 변형을 예측하여 작업공수를 최소화하는 기능을 가지는 것은 탑재에 있어서 자중의 역할을 하므로 중요하다. 따라서, 조립 및 탑재의 정도관리시스템은 ①절단공정에 따른 변형 및 작업 오차예측, ②가공공정에 따른 변형오차예측, ③용접

공정 데이터베이스, ④용접변형예측 및 제어기술, ⑤기계적 변형예측 및 제어기술, ⑥탑재공정에서의 변형예측, ⑦공정별 공수예측, 그리고 이들간의 ⑧유기적인 결합이 요구된다. 따라서 여러 가지 응용 프로그램간의 효과적인 데이터 교류와 전체 생산공정을 시뮬레이션 할 수 있도록 생산공정 전체를 체계화할 필요가 있다. 아래의 Fig. 3은 이러한 조립과 탑재과정의 최적 생산시스템 개발을 위한 각 요소를 그림으로 나타낸 것이다.

이러한 시스템은 객체지향적으로 조립 및 탑재공정을 분석하고 이를 토대로 제품모델을 개발하여 전체 조립 및 탑재의 과정에서 발생하는 변형에 대한 정보체계를 갖추어야만 용접변형제어와 공정분석을 통한 최적 조립 및 탑재공정의 결정을 위한 선박블록 조립 및 탑재의 시스템화 기술을 선박의 구조설계, 용접공정, 정도관리를 위한 변형해석, 탑재공정, 생산공정에 이르기까지 통합하는 연구의 관점에서 고찰할 수 있고, 또 다른 한편으로 생산공정의 합리화를 위하여 메카트로닉스 기술과 연계하여 생산공정의 자동화 및 시스템화 기술의 관점에서 고찰할 수 있는 가능성을 가질 수 있다.

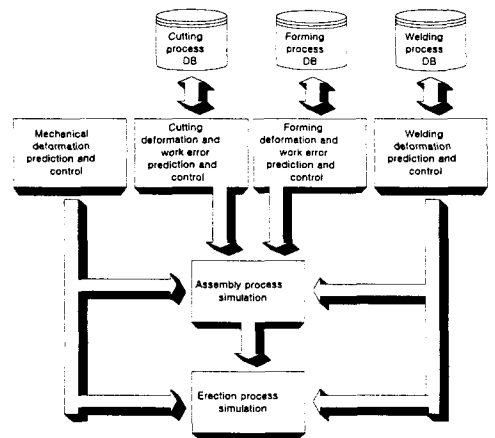


Fig. 3 A conceptual system of assembly and erection process

생산공정의 오차를 최소화하고 자동화를 위한 최적공정을 결정하기 위해서는 CAE를 이용하여 생산과정에서 발생하는 변형이나 잔류응력을 추정하는

방법으로 생산과정을 시뮬레이션하는 동시에 생산과정을 그 흐름에 따라 객체지향적으로 분석하여 관련된 정보를 제품 모델로 체계화하는 것도 필요하다.

따라서, 선박생산의 전 과정에서 부재 또는 중간제품의 생산 및 조립관계, 블록간의 접합여부를 시스템이 판단하여 용접공정, 용접변형해석 및 제어기술이 통합된 시뮬레이션을 통하여 조립뿐만 아니라 탑재까지 최적의 공정정보를 제공하는 시스템이 개발되어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 시스템 중에서 용접과 자중에 의한 평블록의 조립시 변형 예측 시뮬레이션을 구현하였다.

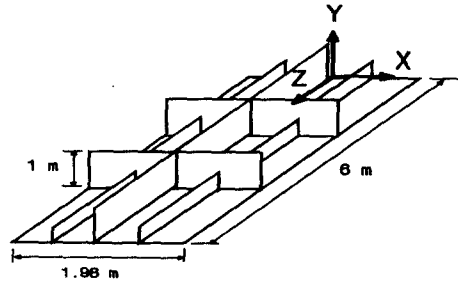


Fig. 5 Unit panel of plane block

용접 변형은 등가강성에 의한 등가하중을 이용하고 자중을 고려하여 ANSYS를 통해 유한요소해석 수치 시뮬레이션 함으로써 계산하였다.

블록의 조립 과정에 대한 해석 절차는 아래의 Fig. 6과 같다.

### 3. 조립변형 예측시뮬레이터

조립시 발생하는 변형은 용접과 자중으로 인한 판의 면내 변형과 면외 변형으로 구분할 수 있다. 면내 변형은 조립과정 중에 접합 되어질 부재와 판의 치수 오차를 발생시키게 되고 면외 변형은 접합 되어질 부재와 판의 형상 오차를 유발하게 된다. 따라서 조립 과정의 구현은 모재에 부재를 용접함으로써 발생하는 면내 변형에 기인한 수축량을 고려한 부재의 치수 변경과 면외 변형으로 발생하는 형상 오차를 교정하는 작업을 포함하여야 한다. 이러한 작업을 포함하여 부재를 모재에 용접하는 과정을 거쳐 블록을 조립하게 된다.

본 논문에서는 아래의 Fig. 4에 나타나 있는 폭 9.8m, 길이 6m, 높이 1m인 선각의 중앙부 이중 평블록을 이용하여 조립 과정에서 발생하는 변형량을 예측하고자 한다.

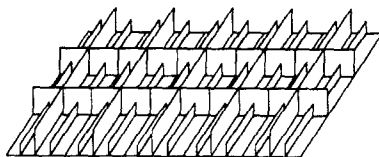


Fig. 4 Midship double bottom plane block

우선 Fig. 5와 같은 특성 형상의 유닛 변형해석을 통하여 전체 평블록의 조립시 발생하는 변형량을 예측하였다.

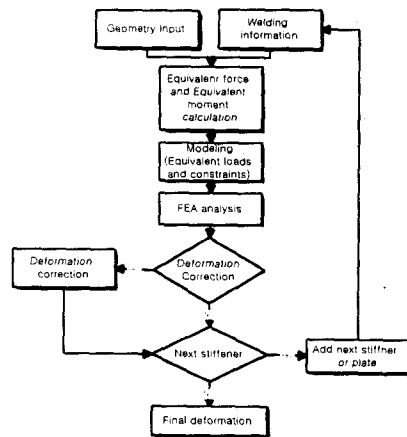


Fig. 6 Flow chart of assembly simulation

변형결과를 고찰하여 교정작업이 필요할 경우에는 교정작업을 수행한 후 다음 부재의 존재 유무를 확인하고 존재할 경우에는 처음 과정으로 되돌아가서 해석을 수행한다. 이때 이전단계에서 해석되었던 변형량을 다음단계에서 고려한다.

## 4. 조립과정의 역학적 모델

### 4.1. 용접의 역학 모델

본 논문은 아래 Fig. 7에 나타나 있듯이 특정한 용접경우에 대한 실험 결과를 이용하여 등가하중을 얻어 이를 해석모델에 적용하고 이를 이용하여 유한 요소해석을 수행함으로써 변형을 예측하였다.

용접에 의한 변형은 크게 용접선을 기준으로 수직인 방향으로의 횡변형과 용접선 방향으로의 종변형으로 구분할수 있다. 횡변형은 횡각변형, 횡수축 변형, 회전변형으로 나눌수 있으며, 종변형은 종굽힘 변형, 종수축변형, 좌굴변형으로 나눌수 있다. 이러한 변형을 아래의 Fig. 8 에 나타내었다.

본 논문에서는 아크 열원에 의한 비드 용접만을 사용하는 필렛 용접과 버트 용접을 고려하여, 용접에 의한 변형을, 널리 사용되고 있는 연강에 대한 Terasaki(7)의 비드 용접의 실험 데이터를 이용하여 횡각변형과 횡수축변형으로 가정하여 용접에 의한 등가하중을 계산하였다.

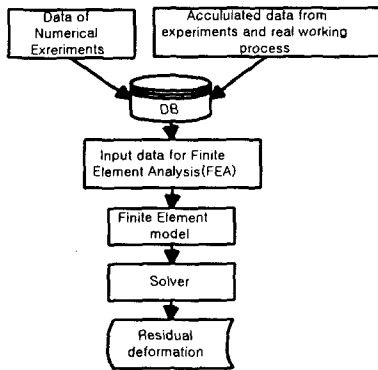


Fig. 7 Configuration of analysis of welding deformation

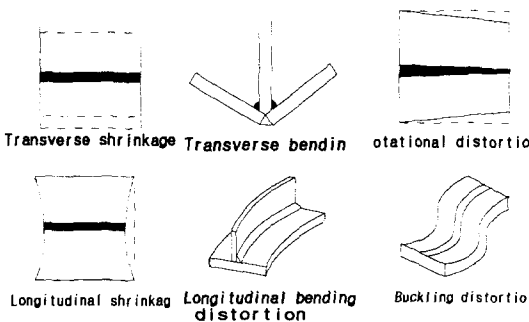


Fig. 8 Welding deformation

비드 용접에 의한 입열량과 변형량은 다음의 Fig. 9와 Fig. 10에 보인 것처럼 알려져 있다. Fig. 9은 비드 용접에 의해 발생하는 각변형량을 입열량과의 관계로 표현한 것이며, Fig. 10은 수축량을 판의 두께로 나눈 값을 입열량의 변화에 따른 것을 나타낸 것이다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 제시한 실험결과를 선형화하여 변형량을 구할 수 있다. 등가강성에 기초한 등가하중 모델을 사용하여 하중과 변형의 관계를 등가하중과 등가강성의 관계로 치환한다. 본 논문에서는 횡방향의 등가수축력 및 굽힘 모멘트의 관계를 이용하여 등가하중을 적용하였다.

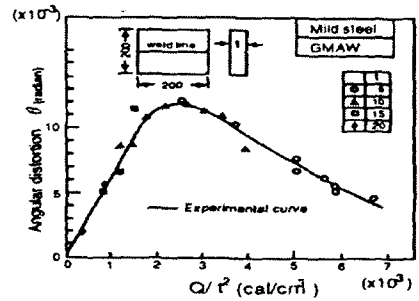


Fig. 9 Relation between heat input rate and angular distortion in case of bead welding

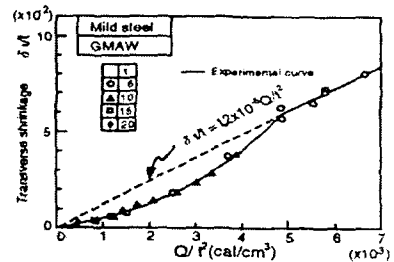


Fig. 10 Relation between heat input rate and transverse shrinkage in case of bead welding

위 변형량을 이용하여 아래와 같은 등가강성에 기초한 등가하중 모델을 사용하여 하중과 변형의 관계를 다음과 같은 등가하중과 등가강성의 관계로 치

환한다[5].

즉, 수축 하중량과 변형량의 관계를 아래의 식 (1)과 같은 선형식으로 가정한다.

$$F_{eqv} = K_{\delta} \times \delta \quad (1)$$

여기서,  $F_{eqv} (kgf)$ 는 등가수축력,

$K_{\delta} (kgf/cm)$ 는 용접열영향부의 등가 수축강성,  $\delta (cm)$ 는 수축량이다.

각변형량과 굽힘 모멘트의 관계도 다음 식 (2)와 같은 등가하중 및 등가굽힘강성의 관계로 가정한다.

$$M_{eqv} = K_{\theta} \times \theta \quad (2)$$

여기서,  $M_{eqv} (kgf)$ 은 등가 굽힘모멘트,

$K_{\theta} (kgf)$ 은 용접열영향부의 등가굽힘강성이고  $\theta (radian)$ 는 각변형량이다.

#### 4.1.1 등가수축력

아래의 Fig. 11은 버트 용접에 의한 등가 수축력과 등가 굽힘 모멘트를 두개의 부재이음에 적용한 모델이다.

앞에서 이미 연강의 비드 용접에 의한 입열량과 변형의 관계식을 실험에 의한 식으로 언급하였듯이 용접에 의한 변형 중에서 용접선에 수직한 판재방향의 횡수축량은 단위 길이당 입열량의 영향을 받는다. 그런데, 이 실험식에 의한 횡수축량  $\delta$ 는 Fig. 12에서 보이는 것처럼 판의 양쪽 끝 부분의 수축량 이므로, 단위 길이당 횡수축력  $F_{eqv} (kgf)$ 에 의한 수축량은 주어진 입열량으로부터 구해진 수축량의 절반에 해당하는 수축량이다.

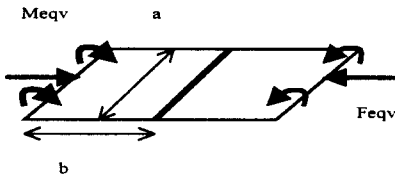


Fig. 11 An equivalent load of butt weld

횡수축응력  $\sigma (kgf/cm^2)$ 과 변형을  $\varepsilon$ 의 변형관계

가 선형적으로 관련이 있다고 가정하고, 다음의 관계식을 이용한다.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

여기에서  $E (kgf/cm^2)$ 는 Young's Modulus이다.

그리고 Fig. 11에 보인 것과 같은 용접선의 길이가  $a (cm)$ 이고 두께가  $t (cm)$ 인 용접에서 다음과 같은 응력과 등가수축력의 관계식이 성립한다고 가정한다.

$$\sigma = F_{eqv} / (a \times t) \quad (4)$$

Transverse shrinkage  $\delta$

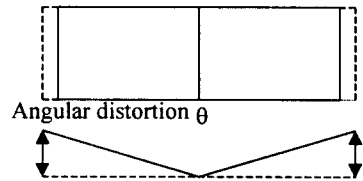


Fig. 12 A deformation of butt welding

그리고, 변형율과 변위사이에도 선형관계식이 성립한다고 보면, 아래와 같은 관계식을 이용할 수 있다.

$$\varepsilon = \delta / (2 \times b) \quad (5)$$

식 (4)과 식 (5)을 식 (3)에 대입하면

$$F_{eqv} / (a \times t) = E \times \delta / (2 \times b) \quad (6)$$

위와 같은 관계식에서 등가 횡수축력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{eqv} = (Eat/2b) \times \delta \quad (7)$$

아래의 Fig. 13은 버트 용접에 의한 등가 수축력과 등가 굽힘 모멘트를 두개의 부재이음에 적용한 모델이다.

#### 4.1.2 등가굽힘모멘트

용접에 의한 각변형량  $\theta (radian)$  또한 단위 길이당 입열량의 영향을 받는다. 각변형량은 Fig. 12에서 보이는 것과 같이 용접선을 기준으로 판재에 수직한 방향으로 양 끝에서 각각  $\theta$ 만큼 변하므로 앞의 식(2)에서 보인  $\theta$ 는 등가 굽힘모멘트에 의한

각변형량의 2배의 값을 가진다. 본 논문에서는 용접선이 고정되어 있고, 굽힘 모멘트가 자유단에서 작용하고 있는 직사각형 판모델로 가정한다. 즉, 길이가  $a(cm)$ 이고 폭이  $b(cm)$ 인 판의 자유단에 단위 길이의 굽힘 모멘트  $M_{eqv}(kgf \cdot cm/cm)$ 이 작용한다고 생각한다. 용접선에 수직한 판재의 방향, 즉 길이방향을  $x$ , 임의의 길이 위치에서의 수직 변형량을  $w$ 라 하면 판의 elemental strip에서의 등가 굽힘 모멘트와 수직 변형량 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_{eqv} = -Et^3 / (12(1 - \nu^2)) \times \frac{d^2w}{dx^2} \quad (8)$$

여기서,  $\nu$  는 Poissons ratio이다.

판의 굽힘강성으로  $D$ 를  $Et^3 / (12(1 - \nu^2))$ 로 정의하면 위 식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$b M_{eqv} = -D \theta \quad (9)$$

위 식을 정리하면, 등가 굽힘 모멘트는 판의 굽힘강성과 폭 그리고 각변형량의 함수로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정리된다.

$$M_{eqv} = -(D/b) \times \theta \quad (10)$$

#### 4.2. 버트 용접

버트 용접을 하는 부재의 대부분은 폭과 길이가 2m와 6m정도의 큰 치수를 가지므로 자중의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으므로 자중의 영향을 고려해야 한다[9]. 그리고 자중의 효과를 고려한 계산을 수행할 때 작업대에 의한 판재 구속조건의 선택이 자중에 의한 판재의 변형에 영향을 미치므로 작업대에 의한 판재 구속조건의 선정이 중요하다[9].

본 논문에서는 판재와 작업대 사이에 압축력이 때 판재의 강성의 100배에 해당하는 강성으로 지지하고 인장을 받을 경우에는 저항하지 않는 스프링으로 작업대를 구성하였다. 다음의 Fig. 13은 두 개의 부재가 맞대기 용접되는 과정을 간략화된 등가 하중인 등가수축력과 등가 굽힘모멘트가 작용하는 모델로 치환한 것이다.

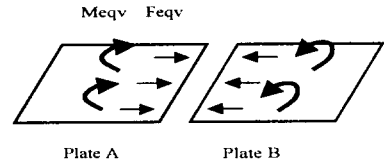


Fig. 13 A simplified model of butt welding process

#### 4.3. 필렛 용접

아래의 Fig. 14는 선체 외판과 거어더가 필렛 용접되는 과정을 등가하중 모델로 모델링한 것이다.

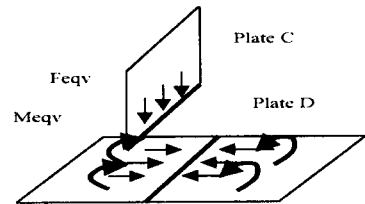


Fig. 14 A simplified model of fillet welding process

필렛 용접 시에는 입열량의 분배를 통하여 하중을 분산시킴으로써 모재와 부재에 작용하는 등가 하중을 분포시킨다. 모재와 부재 자체의 변형은 각각 입열량에 따른 비드 용접에 의한 변형량을 이용하여 등가 하중을 계산한다. 각각의 선체 외판과 거어더에 작용하는 등가하중은 다음과 같다.

(Plate C)에 작용하는 등가 하중

(1) 등가 횡수축력

등가 횡수축력의 값은 전체 입열량의 1/3에 해당하는 입열량에 의한 변형을 일으키는 수축력에 해당하는 값을 가진다.

(Plate D)에 작용하는 등가 하중

(1) 등가 횡수축력

등가 횡수축력의 값은 전체 입열량의 2/3에 해당하는 입열량에 의한 변형을 일으키는 수축력에 해당하는 값을 가진다.

(2) 등가 굽힘 모멘트

등가 횡굽힘 모멘트의 값은 전체 입열량의 2/3에 해당하는 입열량에 의한 각변형을 일으키는 굽힘 모멘트에 해당하는 값을 가진다.

5. 조립과정

선행단계에서 발생한 오차와 변형을 고려하지 않을 경우에는 조립단계에서의 변형은 용접에 의한 열영향, 작업정반의 구속도 및 선공장에서 제작되어진 부재의 취부과정에서 외력에 의한 조정작업으로 인한 잔류응력의 영향 등 매우 다양한 요인에 의해 발생한다. 본 논문에서는 현재 조선소에서 사용하고 있는 평블록의 패널 조립 공정을 모델화하여 평블록 조립을 시뮬레이션 하였다.

5.1. 평블록의 조립

우선 각 블록의 조립 방법을 살펴보면, 평블록 조립 방법은 크게 패널 조립법, 그릴 조립법 두 가지로 나눌 수 있다(6).

패널 조립법은 다시 횡부재의 슬롯형상이 슬릿(slit)의 형상을 가질 때의 삽입법과 보통의 슬롯형상의 경우인 Fitting법으로 나누어지고, 그릴 조립법의 경우도 패널 조립법의 경우와 마찬가지로 슬롯형상이 슬릿의 형상을 가질 때는 삽입법을, 보통의 슬롯형상의 경우에는 Fitting법을 사용하여 횡부재를 조립한다. 패널 조립법은 sub skin-plate를 먼저 용접하여 skin plate를 조립한 다음 그 위에 종부재를 용접한 후, 횡부재를 올려놓고 조립하거나 sub-skin plate에 종부재를 용접한 후 skin plate를 조립하여 평블록을 완성하는 방법이다. Grill 조립법은 종부재를 먼저 횡부재와 조립한후 이를 sub-skin plate나 skin plate에 용접하는 방법이다.

5.2. 이중저 평블록 조립 모델링

본 논문에서는 횡부재를 Fitting하는 방법을 사용하는 패널 조립법을 이용하여 Fig. 4에서 보이는 선체 이중저의 평블록 조립 과정 시뮬레이션을 자중을 고려한 변형에 기초한 등가강성에 따른 등가중을 적용하여 유한요소해석에 의해 변형을 정성적으로 예측하였다.

전체 블록의 조립은 Fig. 5에 보이는 것과 같은 유닛패널을 이용하여 조립과정을 수행하고 완성되어진 유닛패널들을 버트용접에 의해 결합하여 전체 블록을 완성하게 된다. 유닛패널의 조립순서는 먼저 선저판에 종부재를 용접하고 횡부재를 용접하는 조립하는 순서를 선택하였다. 그리고 녹판을 선저판에 용접할 때 종부재를 선행하여 용접한 결과로 발생한 변형을 제거한 후에 녹판을 용접하므로 용접변형을 제거해야 하는데 본 논문에서는 이러한 교정기능을 용접 되어질 부분의 판재에 발생한 변형을 강제변위시켜 해당 부분의 선저판이 취부가 용이한 상태로 되도록 하였다.

6. 조립시뮬레이션

6.1. 유닛패널 모델링

유닛패널을 Fig. 5에서 보여지는 폭1.98m, 높이1m, 길이6m의 2개의 론지와 하나의 거어더를 가지고, 2개의 녹판을 가지는 모델을 사용하였다. 그리고 입열량은 1500(cal/cm)로 일정하다고 가정하였으며, 작업대 사이의 간격은 z방향으로 30cm의 일정한 반복적인 간격을 가진다고 가정하며, 사용되어진 모든 판의 두께는 10mm로 일정한 것으로 가정하였다.

유닛패널의 조립 시뮬레이션의 과정은 다음과 같다(Fig. 15). 먼저 론지 1번을 선저판에 필렛용접한다. 그리고 론지 2번을 필렛용접한 다음, 거어더를 선저판에 필렛용접한다. 녹판 1번을 변형되어진 판에 용접하기 위해서 선행용접으로 인한 횡각변형을 교정기능을 통하여 편평하게 한 다음 수축량을 고려하여 녹판의 길이를 변화시킨 후 선저판과 녹판



과의 필렛용접을 수행한다. 그리고 나서 늑판 1번과 거어더를 십자이음 필렛용접을 수행한다. 늑판 2번도 늑판 1번과 동일한 과정을 거쳐 선저판과 거어더에 필렛용접작업을 수행한다.

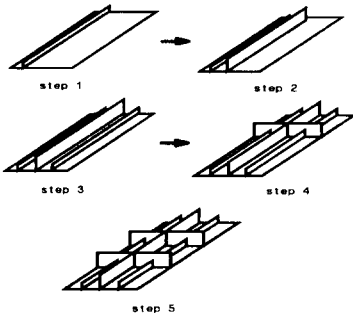


Fig. 15 Assembly order

자중을 고려하기 위해서 선저판과 작업대사이를 압축력에만 저항하는 3차원 truss로 모델링하였다. 또한 작업대와 블록사이에서 자중에 의한 마찰력은 고려하지 않았다.

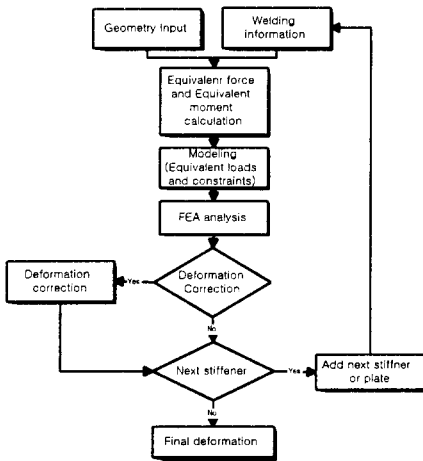


Fig. 16 Analysis flow chart of block assembly simulation

앞의 일련의 과정은 부재를 하나씩 증가 시키면서 용접선에 해당하는 용접 등가하중을 부과하여 변형을 해석하는 것으로 중간 조립 형상의 변화로 인해 강성의 변화를 유발하도록 시뮬레이션 하였다.

이의 모든 과정을 흐름도로 나타낸 것이 아래의 Fig. 16이다.

6.2. 계산결과

자중을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 비교를 위해서 먼저 론지 1번을 필렛용접 하였을 때의 변형을 비교하기 위해서 Fig. 18과 Fig. 19에 용접에 의한 변형형상을 나타내었다. 이 변형 결과 중 모델의 Z방향으로 6m떨어진 경계에서의 Y방향 변위를 그래프로 나타내면 다음 Fig. 17과 같다.

Fig. 17에서 보이듯이 자중을 고려하지 않을 경우에는 끝단에서 약 3.6mm의 변형량이 발생하지만 자중을 고려할 경우에는 모델의 중심에서 약 50cm정도 떨어진 지점에서부터 y방향 변위가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 x방향 반대쪽 끝단에서의 y 방향 변위는 0.79mm에서 0.75mm로 변화 함을 관찰하였다. 따라서, 조립 시뮬레이션에 있어서 중력은 반드시 고려되어야만 한다.

Fig. 20은 최종변형형상을 나타내고 있다.이상의 단위 블록의 조립 시뮬레이션의 수행 결과 종방향의 최대수축량으로 0.01mm를 얻었으며, 횡방향의 최대수축량으로 종방향의 가운데 지점에서 0.1mm를 관찰할 수 있었고, 늑판의 수직방향 수축량은 0.02mm를 얻었다.

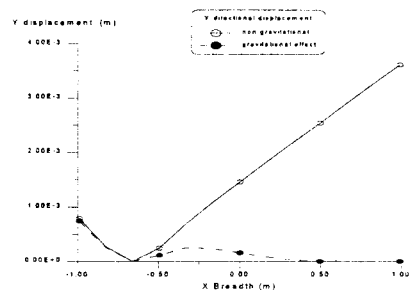


Fig. 17 Out-of-plane displacement in the transverse direction

이처럼 종방향의 수축량이 적게 나온 것은 용접 변형을 위한 등가하중 모델링시 종방향의 변형을 고려하지 않았고, 종방향 부재가 이미 조립되어 있는

상태이기 때문에 종방향의 중간제품의 수축강성이 증가하였기 때문이다. 반면 횡방향으로의 수축량은 전반적으로 0.1mm에 가까운 거동을 보이는데 이는 종방향 부재의 조립으로 인한 횡방향으로의 강성의 증가를 유발하지 않기 때문에 횡수축량이 누적되었기 때문이다.

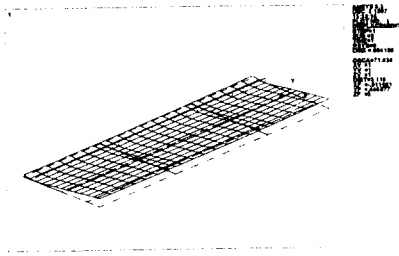


Fig. 18 Deformed shape by welding of longi.1 without gravity

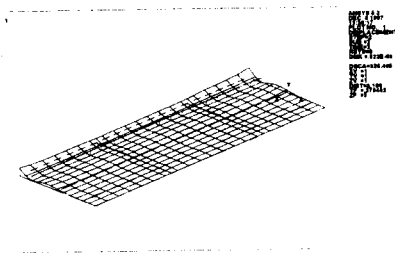


Fig. 19 Deformed shape with gravity

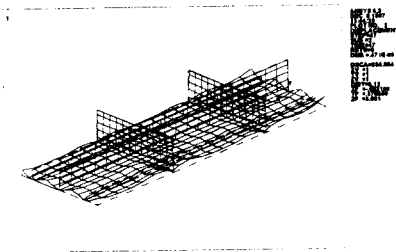


Fig. 20 Final deformed shape with consideration of floor2 fillet welding

### 6.3 평블록 모델링

Fig. 4에 보인 모델을 유닛 패널 모델을 사용하여 조립하는 방법을 사용하였다. 평블록 모델링의 경우는 모든 가정을 유닛패널과 동일하게 적용하여 모델링을 하였다. 다만, 여기서는 유닛 패널 모델에서는 사용하지 않은 버트 용접을 이용하여 유닛패널들을 연결시키고 있다.

### 6.4 계산결과

아래의 Fig. 21은 유한요소해석을 수행한 후의 평블록의 자중과 용접으로 인한 변형을 나타내고 있다. 해석결과는 횡방향으로는 0.85mm의 수축량을 보이며, 종방향으로는 0.06mm의 수축량을 보인다. 이러한 결과는 유닛 패널 모델과 동일한 현상임을 알 수 있다. 즉 종방향부재가 먼저 조립되어진 후에 횡방향 부재가 조립되어지는 순서를 적용했으므로 종방향 부재가 횡방향 부재의 용접으로 인한 수축력에 저항하는 강성의 증가를 유발하게 되어 종방향으로의 수축량이 정성적으로 횡방향의 수축량에 비해 아주 작은 값을 나타내게 된다.

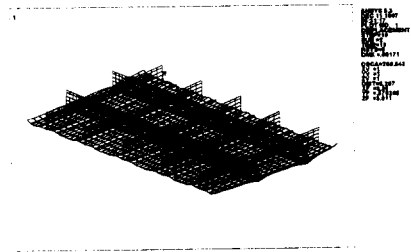


Fig. 21 Final deformation of plane block assembly

이로써 중간 조립제품의 형상의 변화가 강성의 변화를 수반하게 되어 전체적인 변형량에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 반드시 블록의 변형은 조립 순서를 고려하여야 한다.

### 6.5. 선각블록 모델링

이중저 부분의 평블록의 모델링을 이용하여 선각

중앙부 블록에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 다음에 나타난 블록은 이중저 부분과 선측 부분의 블록 등을 모두 포함하고 있다(Fig. 22).

유한요소해석을 위한 가정은 평블록에서 사용한 가정을 그대로 사용하였다.

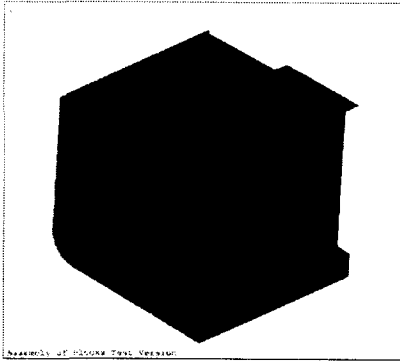


Fig. 22 Block assembly model

### 6.6 계산결과

자중과 용접에 의한 변형으로 인한 최대 수축량은 횡방향으로 약 0.5mm정도 발생하고 있음을 관찰할 수 있다(Fig. 23). 이는 앞서 적용한 유닛 패 널이나 평블록의 경우에는 다소 정성적인 차이를 나

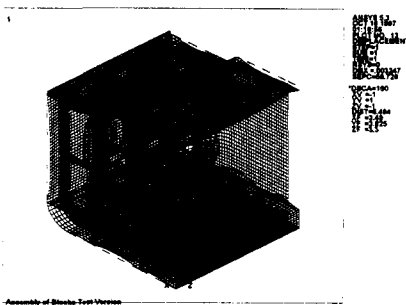


Fig. 23 Deformation of block with welding and gravity

타내고 있는데 이는 횡부재를 먼저 용접하고 종부재를 용접하여 조립하는 순서는 동일하지만 전체 블록에서의 횡부재의 개수가 줄었기 때문에, 조립순

서에 따른 중간제품의 형상의 변화로 인한 강성의 변화를 고려했기 때문이다.

### 7. 결론

본 논문에서는 선박의 절단, 가공, 조립, 탑재 등의 생산공정에 기초한 조립 및 탑재를 위한 시뮬레이션 시스템을 구성하였고 이 시스템 중에서 조립변형 시뮬레이션을 구현하였다. 구현한 모델은 이중저 부분의 평블록을 사용하였으며 자중의 효과를 고려하였다. 용접변형은 실험결과를 이용하는 등가강성에 따른 등가자중을 사용하는 탄성적 해석법을 이용하여 유한요소해석에 의해 예측하였다. 평블록을 이용한 조립과정의 시뮬레이션에서 각 부재간의 용접순서를 달리함에 따라 중간제품의 형상의 변화에 의한 강성의 변화를 변형량의 차이로써 확인할 수 있었으며 변형되어진 판재를 교정기능을 이용하여 변형을 제거하는 과정을 포함시켰다. 이는 블록의 조립 시뮬레이션에서 반드시 조립순서를 고려하여야 함을 나타낸다. 그리고 자중을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우의 변형의 차이를 확인하여 자중은 반드시 고려되어야 함을 보였다. 따라서, 본 연구는 평블록과 같은 조립 시뮬레이션의 구현을 통하여 선박생산성 향상을 위한 정도제어연구와 이를 위한 탑재 시뮬레이션을 위한 기초자료로서의 활용가능성을 보였다.

### 참 고 문 헌

- [1] 정필상 "선각용 후판절단 공정의 3차원 열탄소성 수치해석, " 서울 대학교 대학원 공학석사학위논문, 1997
- [2] 이왕근 "후판의 플라즈마 절단가공에 관한 수치시뮬레이션 연구, " 서울 대학교 대학원 공학석사학위논문, 1996
- [3] Murakawa, H., " Computational welding Mechanics and Its Interface with Industrial Application, " *Journal of Welding and Joining Research Institute*, Vol. 25, No. 2, 1996
- [4] Nomoto, T., Tachechi, S., and Aoyama,

- K., "Development of Simulation System for Erection Stage in Product Definition System, " *Transaction of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 176, pp.575-586, 1994
- [5] Nomoto, T., Takechi, S., and Aoyama, K., "Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformation," *Transaction of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 181, pp.249-260, 1997.
- [6] Okumoto, Y., and Matsuzaki, S., "Approach to Accurate Production of Hull Structures, " *Journal of Ship Production*, Vol. 13, No. 3, pp. 207-214, 1997
- [7] Satoh, K. and Terasaki, T., "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, " *Journal of the Japanese Welding Society*, Vol. 45, No.4, 1976 (in Japanese)
- [8] Ueda, Y., Murakawa, H., Gu, S.M., Okumoto, Y., and Kamichika, R., "Simulation of Welding Deformation for Precision Ship Assembling(Report I), " *Transactions of Joining and Welding Research Institute*, Vol. 21, No. 2, pp.125-135, 1992
- [9] Ueda, Y., Murakawa, H., Gu, S.M., Okumoto, Y., and Kamichika, R., "Simulation of Welding Deformation for Precision Ship Assembling(Report III), " *Transactions of Joining and Welding Research Institute*, Vol. 25, No. 1, pp. 69-79, 1996