기하적인 형상 변형을 이용한 선박 브라켓 부재의 역변형 설계

천상욱[†] · 김형철

대우조선해양(주) 중앙연구소

Counter-deforming Method for a Bracket Design of a Ship Via Geometric Shape Deformation

Sanguk Cheon[†] and Hyeong-Cheol Kim

Information Technology Team, DSME

Received 26 March, 2013; received in revised form 25 June, 2013; accepted 2 July, 2013

ABSTRACT

A method of designing a manufacturing shape of ship plate parts considering welding deformation is introduced. In this paper, the design shape of a bracket is deformed not by a thermo-elastic method but by a pure geometric method. Deformation quantities are estimated based on data captured in the field and then a manufacturing design shape is obtained by deforming an original design shape by a geometric deformation method. The proposed method has been implemented and tested in the shipyard.

Key Words: Bracket, Shape deformation, Shipbuilding, Ship plate, Welding deformation

1. 서 론

선박 부재 중 선각 어셈블리(hull assembly)는 용접에 의해 만들어진다. 보강재(stiffener)나 플랜지(flange)를 용접하여 제작하는 어셈블리의 경우, 폭 대비 길이가 긴 형상의 어셈블리는 용접에 의한 열변형이 발생한다. 부재의 강도 보강을 위해 부재의 길이 방향으로 보강재나 플랜지를 용접하면, 용접부에서 발생하는 굽힘 변형력으로 인해 부재의 전체 형상이 부채꼴 형태로 변형되는 굽힘 변형이 발생한다.

열변형은 제품의 형상, 치수, 재질 뿐만 아니라 결합 조건이나 구속 조건, 결합 순서 등이 영향을

복합적으로 받는 현상으로 이를 제어하기란 상당히 어렵다^[1]. 용접 열변형은 부재의 길이 또는 폭이 변하는 단순 열변형과 부재의 형상 자체가 변하는 복합 열변형으로 나눌 수 있다. 단순 열변형의 경우 기존의 설계 기술로 제어가 가능하나, 복합 열변형의 경우 이를 제어할 수 있는 설계 기술이 존재하지 않는다. 단순 열변형의 경우 조선 CAD 시스템이 열변형을 고려한 절단 도면 생성 기능을 제공하지만, 복합 열변형의 경우 그러한 기능을 제공하는 조선CAD 시스템이 존재하지 않기 때문에 조선소에서 이를 해결하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다.

2. 관련 연구 및 연구 범위

선박 블록은 소조립, 중조립, 대조립의 순서로

[†]Corresponding Author, su.cheon@gmail.com
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

Fig. 1 Manual heating work for counter-deforming

작은 부재들을 조립하여 생성되는데, 각각의 조립물을 소조, 중조, 대조라고 부른다. 본 연구의 대상인 브라켓(bracket)은 소조에 해당한다. 소조립 과정에서 어셈블리에 복합 열변형이 발생한 경우, 소조를 중조립에 사용하기 전에 부재를 설계형상대로 복원해야만 한다. 현재 조선소에서는 복합 열변형을 제어하는 자동화된 소프트웨어 시스템이나 기계 장치가 존재하지 않기 때문에, 현장의 숙련 작업자의 경험과 기술에 의존하여 부재에 다시 열가공을 하여 원래 설계 형상대로 복원하고 있다. Fig. 1은 보강재를 용접한 후 굽힘 변형이 발생한 브라켓을 세 곳을 가열하는 3점 가열 방법으로 설계 형상대로 복원하는 실제 작업 모습이다.

Park 등^[2]는 본 연구와 동일하게 소조립 용접에서 발생하는 굽힘 변형을 고려하여, 용접 굽힘 변형에 의한 변형량을 설계 형상에 역으로 반영하는 방법을 제안하였다. 기하적인 방법을 사용한 본 연구와는 달리 유한요소법(FEM, finite element method)을 이용하여 설계 형상을 변형하였는데, 적용 방법에 대한 구체적인 사항은 기술되어 있지 않다. Jang 등^[3]는 고유변형도법(inherent strain method)에 기반한 삼각가열(triangle heating) 해석 모델을 제안하고, 선체 외판 부재를 만들기 위해 사용되는 평판이나 실린더형 곡판의 삼각 가열에 의한 변형을 실시간으로 해석 가능함을 실험을 통해 보였다. 이 방법은 곡가공 부재를 가공할 때 적용할 수 있는 것으로 본 논문에서 대상으로 하는 브라켓에는 적용 가능하지 않다. Park 등^[4]은 곡 빌트업 T바(built-up T bar)의 자동 역설계를 위해, 유한요소법에 의한 간이 열탄소성 해석법을 이용하여 용접에 의한 굽힘 변형을 예측하였다. 열탄소성 해석에 기반한 방법은 용접선 에지를 FEM의 1차원 요소로 전환하고, 주부재를 빔 요소로 지정하거나 열영향부의 단면적을 입력하는 등의 과

정이 필요하다. 그러나, 설계부서의 설계원들이 어셈블리를 설계할 때 생산과 관련된 이러한 부분을 고려하기 어려운 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서, 본 연구에서는 현장에서 계측, 수집한 용접 굽힘 변형량을 이용하여 설계 형상의 변형량을 추정하고, 추정 변형량을 이용하여 형상을 기하적으로 변형하는 방법을 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 방법의 개요를 설명하고, 4장에서는 용접 변형량을 추정하는 방법을 설명하고, 5장에서는 설계 형상을 기하적으로 역변형하는 방법을 설명하고, 6장에서 결어를 제시한다.

본 연구는 소조 단위의 선박 어셈블리 중에서 브라켓의 역변형 설계에 대해서만 다룬다. 또한, 여러 종류의 브라켓 중에서 일부 브라켓만을 대상으로 한다. 현장에서 용접 굽힘 변형에 의한 변형량이 일부 브라켓에 대해서만 수집되었기 때문이다. 하지만 4장에서 소개된 것과 다른 방법에 의해 변형 추정량을 계산할 수 있으면, 5장에서 소개되는 설계 형상 역변형 방법은 임의 브라켓의 역변형 설계에 적용이 가능하다.

3. 제안하는 방법의 개요

본 연구에서 제시하는 방법의 입력은 브라켓을 구성하는 웹(web)의 설계 데이터 및 현장에서 계측하고 수집된 브라켓의 용접 굽힘 변형에 의한 변형량이다. 출력은 용접 열변형을 고려해서 역변형된 웹의 절단용 설계 데이터이다. 웹의 설

Fig. 2 Illustration of welding deformation: (a) a design shape of a bracket, (b) a deformed bracket after welding a stiffener onto a web

Fig. 3 Illustration of counter-deformation: (a) a counter-deformed design shape of a bracket, (b) a deformed bracket after welding a stiffener onto a web

계 데이터는 조선 CAD 시스템에서 추출한 웹의 경계 곡선, 내부 구멍 곡선, 보강재가 용접되는 곡선으로 구성된다.

Fig. 2에서와 같이, 폭 대비 길이가 긴 브라켓은 용접에 의해 웹에 굽힘 변형이 발생하게 된다. 실제 변형량은 웹 길이에 비해 매우 작아서, 그림은 이해를 돕기 위해 굽힘 변형량을 과장한 것이다. 가공용 설계 형상을 역변형시킨 모양으로 절단한 뒤, 보강재를 용접하면 Fig. 3와 같이 용접 열변형에 의해 웹가 목적하는 원래의 설계 형상대로 변하게 된다.

이러한 용접 열변형을 고려한 역변형 설계 형상

자동 생성은 5단계로 구성된다(Fig. 4). 현장에서 부재의 용접 열변형에 의한 변형량을 수집한다(A1). 수집한 변형량을 활용하여 설계 형상의 수치 데이터로부터 용접 열변형에 의한 변형량을 추정한다(A2). 조선 CAD 시스템에서 부재의 설계 데이터를 추출한 후 역변형을 적용하기 위해 전처리를 한다(A3). 추정 변형량 값에 의해 설계 형상을 역변형한다(A4). 최종적으로 역변형 설계 형상을 가공도면으로 출력한다(A5).

4. 용접 변형량 추정

본 연구에서는 열탄성 해석을 통해 변형량을 산출^[4]하는 대신, 현장에서 계측, 수집한 용접열변형에 의한 변형량을 이용하여 설계 형상의 변형량을 추정하였다. Fig. 5와 같이 형상 및 슬롯의 유무에 따라 어셈블리를 구분하고, 각 종류에 대해 용접 변형량을 수집하였다. Fig. 5에서 L3 타입은 웹의 면에 보강재를 용접하는 경우이고, T 타입은 웹의 에지에 플랜지를 용접하는 빌트업 T바의 경우이다. 일반적으로 T 타입이 폭에 비해 길이가 길어서 용접 변형량이 크다.

본 연구에서는 일부 종류에 대해 각각 수십 개의 용접 변형량 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터는 웹의 길이, 폭, 두께, 슬롯(slot)의 개수, 보강재나 플랜지의 폭, 두께 및 용접 변형량인 직

Fig. 4 Counter-deforming procedure of a design shape

Fig. 5 Type of target models

Fig. 6 Definition of two deformation quantities – taper and straightness

Data	y (straightness)	X ₁ (web length)	X ₂ (web width)	X ₃ (web thickness)	X ₄ (no. of slots)	X ₅ (stiff. width)	X ₆ (stiff. thickness)
1	y ₁	x ₁₁	x ₂₁	x ₃₁	x ₄₁	x ₅₁	x ₆₁
2	y ₂	x ₁₂	x ₂₂	x ₃₂	x ₄₂	x ₅₂	x ₆₂
3	y ₃	x ₁₃	x ₂₃	x ₃₃	x ₄₃	x ₅₃	x ₆₃
...	...	...	...	...	...	...	...
N	y _N	x _{1N}	x _{2N}	x _{3N}	x _{4N}	x _{5N}	x _{6N}

Fig. 7 Observation data

선도(straightness), 테이퍼(taper)이다. 직선도와 테이퍼는 현장에서 사용하는 용어로서, Fig. 6에서와 같이, 직선도는 폭 방향의 변형량이고, 테이퍼는 길이 방향의 변형량이다.

용접 변형량 추정을 위해 회귀 분석(regression analysis) 기법을 사용하였다. Fig. 7과 같이, 수집한 웨브의 길이, 폭, 두께, 슬롯의 개수, 보강재의 폭, 두께, 용접 각목의 두께를 독립 변수로 정의하고, 직선도 및 테이퍼를 의존 변수로 정의하여 각각을 다중 회귀 모델(multiple regression model)로

Fig. 8 Relationship between shape ratio and straightness

모델링하여 변형량을 추정하였다. Fig. 8은 수집된 데이터에서 웨브의 길이와 폭의 비율(width/length, shape ratio)과 직선도의 관계를 도식한 것으로, 변형에 가장 영향을 많이 미치는 웨브의 길이와 폭의 비율이 직선도와 선형적인 관계에 있다고 판단할 수 있다. 테이퍼의 경우도 유사하게 나타났다.

이러한 관측을 기반으로 직선도 및 테이퍼가 다른 변수가 선형적인 관계라고 가정 한 후, 식 (1)과 같이 선형 모델을 만들고, 최소 자승법에 의해 계수를 계산하였다.

$$y_i = a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_6x_{6i} + b_i \quad (1)$$

식에서 b_i 는 오차로서, 부재의 강판 종류에 따라 다르게 설정되었다. 계산된 계수를 적용하여, 임의의 어셈블리 형상에 대해 직선도 변형량을 추정하였다. 같은 방법으로 테이퍼 변형량도 계산하였다.

5. 설계 형상 역변형

4장에서 계산한 추정 변형량과 웨브의 설계 형상을 입력으로 하여 형상을 역변형한다. 역변형은 형상 변형(shape deformation) 방법^[5,6]중에서, 삼각형 메쉬(mesh)를 이용한 기하적인 형상 변형 방법^[5]을 이용하였다. 삼각형 메쉬를 이용한 기하 형상 변형 방법은 설계 형상으로부터 삼각형 메쉬를 생성하고, 삼각형 메쉬를 변형한 후, 변형된 메쉬로부터 최종적으로 변형 설계 형상을 구하는 방법이다. Fig. 9과 같이, 설계 형상의 외곽 정보(a)를 이용하여 삼각형 메쉬(b)를 생성하고, 삼각형 메쉬를 변형(c)한 다음, 변형된 삼각형 메쉬에 대응하는 외곽 정보(d)를 구한다.

Fig. 9 A method for shape deformation: (a) a design shape, (b) a mesh of a design shape, (c) a deformed mesh, (d) a modified design shape corresponding to the deformed mesh

상세한 기하 형상 변형 과정은 다음과 같다. 먼저 조선 CAD 시스템의 설계 도면에서 형상의 외곽 정보를 추출한다. 형상 변형 과정에서 사용자의 별도 입력을 요구하지 않고 전체 과정을 자동화하기 위해 외곽 형상의 기하 요소를 이동 및 회전 변환하는 전처리 작업을 수행한다. 전처리 작업에서는 형상의 OBB(oriented bounding box)를 계산하고, OBB의 긴 변이 X축과 평행하게 되는 회전변환을 원래 형상에 적용하게 된다. 전처리 결과로부터 비교적 균일한 형태의 삼각형 메쉬를 생성한다. 생성된 삼각형 메쉬의 상호 연결 관계, 외곽 정보 및 기하 요소와 삼각형 메쉬의 관계를 저장한다. 저장된 정보는 추후 변형된 삼각형 메쉬로부터 외곽 정보를 재구성하는데 사용된다. 그 다음, 삼각형 메쉬의 일부 정점을 이동한 후, 이동한 정점들에 의한 전체 삼각형 메쉬의 변형을 계산한다. 최종적으로, 앞서 저장된 정보를 이용하여 변형된 삼각형 메쉬에 대응하는 새로운 외곽 정보를 재구성한다. 이 때, 외곽에 해당하는 삼각형 메쉬를 찾고, 찾은 삼각형들의 정점을 연결하는 곡선을 생성한다. 어셈블리를 용접할 때 사용하는 가공 허용 오차를 이용하여, 생성한 곡선을 선분이나 원호로 변환한다.

Fig. 10은 일부 정점을 이동하여 삼각형 메쉬를 변형하는 방법은 나타낸다. Fig. 10(a)와 같이 삼각형 메쉬의 좌우 변의 중앙 부분에 고정점(fixed point)을 설정하고, 위와 아래 변의 중앙 부분과 오른쪽 위, 왼쪽 위 부분에 이동점(moving point)을 설정한다. 고정점은 이동점이 대응하는 변형 벡터만큼 이동했을 때 위치가 변하지 않는 정점이다. 이 때, 위와 아래 변의 중앙 부분의 이동점의 이동량은 4장에서 추정된 직선도이고, 오른쪽 위 및 왼쪽 위 부분의 이동점의 이동량은 4장에서 추정된 테이퍼 값을 사용한다. 위와 아래 변의 중앙 부분

Fig. 10 Deformation of a mesh: (a) moving points, fixed points, and movement vectors, (b) a deformed result

의 이동점의 이동 방향은 벡터로 표시했을 때 (0, 1) 방향이다. 오른쪽 위 및 왼쪽 위 부분의 이동점의 이동 방향은 해당 변의 길이가 L , 추정 테이퍼 값이 b 일 때, $\arcsin(b/2L)$ 각도만큼 해당 변을 회전했을 때의 회전된 변의 끝점에서 원래 변의 끝점을 뺀 벡터이다. Igarashi 등^[5]의 방법을 이용하여, Fig. 10(a)와 같이 2 점을 고정점을 설정하고 4개의 이동점을 이동시키면, 삼각형 메쉬가 Fig. 10(b)와 같이 변형된다.

고정점을 고정시킨 채, 이동점의 이동에 의해 삼각형 메쉬를 변형하는 것은 메쉬의 각 삼각형의 변형을 기하학적으로 최소화하는 방법에 의해 이루어진다. 삼각형 메쉬 전체를 물리적으로 구부러지지 않는 물체가 하나의 엔티티로 이동하는 강체와 유사하다고 가정하고, 외력에 의한 변형이 아주 작은 강체처럼 형상이 변형되게 된다. 기하적으로는 이동점에 의한 삼각형 메쉬의 총 변형량을 2차식으로 만들고, 2차식의 그래디언트(gradient)를 0으로 만들어서, 총 변형량을 최소화하는 모든 삼각형 메쉬의 정점의 위치를 계산하는 방식으로 이루어진다. 총 변형량은 삼각형 메쉬의 정점이 N 개일 때, $2N$ 개의 변수를 가진 2차식으로 정리된다. 고정점이 M 개일 때, 2차식의 그래디언트로부터 미지수가 $2(N-M)$ 개이고, 1차 방정식이 $2(N-M)$ 개인 연립 1차 방정식으로 구해진다. 이를 계산하여 이동점 및 고정점을 제외한 다른 정점들의 새로운 좌표값을 구한다. 상세한 식은 Igarashi 등^[5]의 논문에 기술되어 있는데, Appendix에 간단하게 내용을 소개하였다. 계산은 복잡하지 않으나, 수천 개의 연립 방정식을 계산해야 하기 때문

Fig. 11 A procedure for the overall counter-deforming method

에, 시스템을 개발할 때 희소 행렬(sparse matrix)에 대한 빠른 계산이 필요하다.

Fig. 11은 상기에서 소개한 전체 과정을 순서대로 나타낸 것이다. 입력이 웹의 원래 설계 형상일 때, 먼저 a 단계와 같이 원래 설계 형상에서 기하 정보를 추출하고, b 단계에서 기하 정보를 전처리한다. 전처리는 같은 직선 상의 선분을 연결하고, 전체 기하 요소를 OBB를 이용하여 수평축 방향으로 회전하고, 외곽선의 시작점을 변경하는 것으로 이루어진다. c 단계에서 웹의 종류를 설정한다. 웹의 종류에 따라 이동점의 정의 및 변형량 추정이 다르게 이루어진다. d 단계에서 변형량을 추정하고, e 단계에서 전처리 결과를 이용하여 삼각형 메쉬를 생성한다. f 단계에서 추정 변형량 및 인식된 웹의 종류에 따라 이동점 및 고정점을 정의한다. g 단계에서 삼각형 메쉬를 변형하고, h 단계에서 역변형된 삼각형 메쉬로부터 기하 정보를 재구성한다. 최종적으로, i 단계에서 기하 정보를 후처리하여, 생산 도면 생성을 위해 조선 CAD 시스템에서 정의된 포맷대로 웹 형상 정보를 표현한다.

Fig. 12는 구현된 시스템을 이용한 설계 형상 역변형의 예이다. 비대칭 형상이나 슬롯이 존재하는 경우도 처리가 가능함을 볼 수 있다. 이해를 돕기 위해 변형량을 과장하였는데, 실제 변형량은 웹의 길이가 1,500~3,000 mm 정도일 때, 보통 15 mm를 초과하지 않는다.

본 연구에서 소개한 방법은 기존의 관련 연구와 달리, 역학적인 방법에 의해 용접 변형 형상을 계산하는 대신 현장에서 수집한 변형량 데이터를 이용하여 변형량을 추정하고 순수하게 기하적인 방법에 의해 형상을 변형하였기 때문에, 현장 테스트를 통한 확인 및 수정이 필수적이다. 소개된 방법의 유효성 확인을 위해, 조선소에서 실제 건조

Fig. 12 Examples of counter-deformed design shape

중인 선박의 브라켓에 대한 실물 테스트를 실시하였다. 선박 용접에서 브라켓의 경우, 설계 모델과 실제 가공된 부재의 허용 가능한 오차 범위는 3 mm이다. 본 연구에서 사용한 변형량 추정법을 이용하여 변형량이 3 mm 이상인 것 중에서 형상이 다른 3개의 브라켓을 선택한 후, 절단 형상이 설계 형상과 비교하여 용접 허용 오차 이상으로 변형되게 가공 도면을 생성하고, 관련자들의 입회하에 강재를 절단하였다. 절단된 3개의 부재는 보강재를 용접한 후에 모두 원래 설계 형상과 비교하여 용접 허용 오차 이내로 변형되었고, 현장 작업자에 의해 추가 열가공에 의한 변형 작업이 필요하지 않다는 것이 확인되었다.

6. 결 론

기하적인 형상 변형 방법을 이용하여, 선박 부재의 용접에 의한 열변형을 고려한 브라켓의 절단용 형상 설계 방법을 소개하였다. 현장에서 계속, 수집한 용접 열변형에 의한 변형량을 이용하여 설계 형상의 변형량을 추정하고, 추정 변형량을 이용하여 형상을 기하적으로 변형하여 역변형 설계 형상을 계산하였다.

현재 이 방법은 조선소에서 현장에 적용되고 있지 않다. 본 연구에서 소개된 방법에서는 어셈블리의 종류에 따라 이동점과 고정점을 설정하는 방법이 달라지는데, 이를 위해서 현재는 설계자가 어셈블리의 종류에 맞는 설정 방법을 선택해야만 한다. 설계자가 설정 방법을 잘못 선택했을 경우, 강재의 손실로 이어지거나 기존에 비해 더 많은 추가 작업이 필요해질 수 있다. 추후 현장 적용을 위해서는 설계자가 어셈블리의 종류에 맞는 설정 방법을 선택할 필요가 없도록 어셈블리 종류를 인식

한 후, 설정 방법을 자동으로 결정하는 연구가 필요하다.

References

1. Jang, K.B. and Cho, S.M., 2003, The Analysis of Welding Deformation in Arc-spot Welded Structure (II) – Displacement Monitoring and Deformation Analysis, *Journal of KWS*, 21(4), pp.450-456.
2. Jang, C.D., Ko, D.E. and Ha, Y.S., 2008, Simulation of Plate Deformation due to Triangle Heating Using Inherent Strain Method, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.703-709..
3. Park, J.G., Cho, S.M., Heo, H.Y., Yi, M.S., Jan, T.W. and Kim, Y.G., 2013, Development of Automatic Re-design System Based on Shipbuilding CAD System, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, Pyeongchang, January, pp.489-491.
4. Park, J.K., Ha, Y.S. and Yang, J.H., 2008, Method for Designing of Automatic Curved Built-up by Using 1 Dimensional Equivalent Thermal Expansion Coefficients, Samsung Heavy Industry, *Patent 10-0903904-0000*.
5. Igarashi, T., Moscovich, T. and Hughes, J.F., 2005, As-rigid-as-possible Shape Manipulation, *ACM Trans. Graphics*, 24(3), pp.1134-1141.
6. Weng, Y., Xu, W., Wu, Y., Zhou, K. and Guo, B., 2006, 2D Shape Deformation Using Non-linear Least Squares Optimization, *The Visual Computer*, 22(9), pp.653-660.

Appendix

Fig. A-1은 본 연구에서 기하적인 형상 변형을 위해 사용한 Igarashi 등^[5]가 소개한 2D 형상 변형 방법을 나타낸 것이다. 2개의 고정점(왼손, 가슴)

과 1 개의 이동점(오른손)을 설정한 후, 이동점 위치를 변경하면 형상이 변형된다.

Fig. A-1. A shape deformation method introduced by Igarashi^[5]

형상 변형 계산은 간단히 나타내면 다음과 같다. 삼각형 1개 만을 고려할 때, Fig. A-2(a)가 Fig. A-2(b)와 같이 변형될 때의 오차를 식 (2)와 같이 정의한다. v_2 의 오차를 구할 때, 이동, 회전, 스케일링에 의해 v_0 와 v_0' , v_1 과 v_1' 을 일치시키는 것이 필요하다. 이러한 방식으로 메쉬의 모든 점에 대한 오차의 총합이 최소가 되는 각 점의 위치를 계산한다.

$$E_{v_2} = \| v_2^{\text{desired}} - v_2' \|^2 \quad (2)$$

Fig. A-2. v_2^{desired} is obtained by fitting the original triangle to the target triangle by translation, rotation, and scaling so that v_0 and v_1 match v_0'

천 상 욱

1994년 한국과학기술원 산업공학과
학사

2002년 포항공과대학교 산업공학과
석사

2008년 한국과학기술원 기계공학과
박사

2008년~현재 대우조선해양 중앙연
구소 정보기술팀

관심분야: Ship CAD, CAD/CAM

김 형 철

1989년 서울대학교 조선공학과 학사

1998년 포항공과대학교 정보통신학
과 석사

1989년~현재 대우조선해양 중앙연
구소 부장

관심분야: CAD/CAM, Modeling &
Simulation