

곡가공을 위한 변곡 곡면의 판정

김찬석^{1,†} · 신종계²
서울대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소²

Determination of plates with inflection lines for hull plate forming

Chan Suk Kim^{1,†} · Jong Gye Shin²
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Hull plate consists of various types of curved plates and there also exists corresponding processing methods. Typically, curved plates can be divided into convex type and saddle type. Large amount of research has been conducted mainly focusing on application of processing method of convex type, saddle type and hybrid type, but research on determination and processing method application of the most difficult S-shaped curved plate that has inflection lines has not been carried out yet. In this paper, as the fundamental research of appropriate processing method application, a calculation method is proposed to calculate inflection lines on curved plates. In order to calculate inflection lines, normal curvature and information of fabricated curved plates should be utilized. We compare the workability of the fabrication for hull plate using inflection line.

Keywords : Hull plate forming(곡가공), Inflection line(변곡선), Roll bending(롤 벤딩), Normal curvature(법선 곡률)

1. 서론

선박의 생산 시 선체외판 곡면을 가공하기 위해 선체외판을 분할한다. S곡이란 하나 이상의 변곡선을 포함한 선체 외판 곡면을 뜻한다. 성형가공 시 가공공수가 많이 필요하고 가공이 어려운 S곡을 분할과정에서 최대한 제거한다.

분할이 완료된 선체외판은 절단을 위해 곡면에 대한 전개작업을 실시하게 된다. 이때 성형과정에서 수반 되는 변형을 고려하여 마진을 부여한다. 그 후 전개형상에 대한 절단 작업을 실시한다. 절단된 철판은 선체외판 곡면을 지배적으로 구성하는 1차 곡에 대한 성형을 냉간가공(롤 벤딩)을 통해 수행하고 성형가공이 더 필요하면 열간가공을 진행하여 목적형상에 대한 전체 성형을 마무리한다.

선체외판의 성형과정을 역학적인 측면에서 살펴보면 성형에 필요한 변형량을 얻기 위해 성형가공을 진행하고자 하는 철판에 기계적인 하중이나 열하중을 가하게 된다. 이때 철판에 변형이 발생하게 된다. 다시 가해진 하중을 제거하면 하중이 가해지기 전 형상으로 철판은 되돌아 가려 한다. 하지만 완전하게 변형 전 형상으로 돌아가지 못하고 약간의 변형이 철판에 잔류하게 된다. 이 때 철판에 잔류하는 변형은 가공 시 사용한 하중의 종류에 따

라 달라지게 된다. 롤 벤딩을 이용한 기계적인 하중의 경우 성형하고자 하는 실린더형상의 곡률에 비례한 크기만큼 변형이 잔류하게 되고, 열적 하중의 경우 가열 후 냉각 시 자연 냉각보다 냉각수를 이용한 강제 냉각을 실시하게 되면 철판에 잔류하는 변형량이 더 커지게 된다. 앞에서 언급한 일련의 과정을 반복하게 되면 철판의 형상이 평판에서 곡면으로 점진적으로 변화하게 된다.

대부분의 성형에 필요한 변형은 냉간 가공으로 얻어진다. 냉간 가공 후 성형에 필요한 변형량이 부족하면 그 부족한 부분에 대한 성형을 열간가공으로 진행한다. 전개형상과 목적형상의 차이로 계산되는 변형률과 냉간가공 후 형상과 목적형상 사이에서 변형률을 각각 계산하여 그 합을 비교하면 후자가 전자보다 작은 것을 알 수 있다. 전체 변형률의 합은 철판을 원하는 형상으로 만들기 위해 성형과정에서 소비되는 에너지량과 밀접한 관련이 있다. 따라서 냉간가공에 의해 선체외판이 성형되는 정도에 따라 열간가공 단계의 작업시간 및 필요한 열량이 달라지게 된다. 선체외판 곡면의 1차 냉간 가공에 대한 연구는 국내에서 많이 진행되었다.

Kim, et al. (1999)은 피라미드 롤러의 곡면 성형과정에 대한 수치해석을 수행 했다. 그리고 곡면의 곡률에 맞게 굽힘량을 결정하는 방법을 제안 했다. Park (1997)은 곡면이 가지고 있는 곡률에 대한 정보를 통계적 방법을 통해 분석하여 굽힘영역의 결정 방법을 제안 했다.

Yoon, et al. (1999)은 실제 조선 생산현장에서 1차 냉각가공 후 2차 열간가공을 진행하는 공정의 특성을 고려해 냉간가공에 필요한 생산정보를 획득에 관한 연구를 진행했다. 그가 제안한 방법은 두 단계로 구성된다. 첫 단계는 롤 벤딩 축이 위치해야 할 주 방향을 결정하는 단계이고 마지막 단계는 축이 전개형상 위에 위치해야 하는 지점에 대한 결정이다. 축의 위치를 결정하기 위해 축 방향을 법선벡터로 하는 여러 개의 평면을 이용해 가공하고자 하는 곡면과 평면들간의 교차선을 계산한다. 이후 교차선들을 근사하는 곡선을 실린더의 단면곡선으로 사용해 냉각가공하고자 하는 선체외판 곡면의 형상을 근사는 실린더를 정의했다.

Ryu, et al. (2007)는 차분진화 기법을 적용해서 음 함수의 형태로 정의된 실린더형 곡면의 형상 변수를 결정하는 연구를 진행했다. 음 함수 곡면식을 구성하는 변수를 얻기 위해 가우스 곡률을 이용해 목적함수를 구성하고 음 함수를 구성하는 변수를 값으로 하는 시스템을 정의한 후 차분진화 기법을 적용해 음 함수 곡면을 구성하는 변수를 얻었다.

기존에 제안된 방법들은 철판의 한쪽 면만을 굽히는 가공의 경우 S곡이 아닌 곡면에 대해서는 매우 유효한 방법이라 할 수 있다. 반면 철판의 양쪽 면을 롤 벤딩으로 굽혀 가공하는 S곡에 적합한 1차 냉간가공 정보라 하기는 어렵다.

본 연구에서는 냉간가공 정보의 향상을 위한 기초연구로 선체외판 곡면에 변곡선이 있는 경우 이를 계산하는 방법에 대해 논의하고자 한다. 그리고 제안된 방법을 통해 선체외판 성형가공 시 곡판의 가공 적합성을 확인한다.

곡면의 변곡선을 계산하는 방법과 유사한 문제를 풀이하는 방법에 관한 연구로는 다음과 같은 것들이 제안 되어있다.

Meakawa and Patrikalakis (1994)는 상징연산(symbolic operation)을 이용하여 생산을 위한 곡선/곡면의 형상 특성에 관한 연구를 수행했다. 상징연산이란 매개변수 형태로 주어진 곡선/곡면간의 대수적인 연산을 의미한다. 상징연산에서 가능한 대수적 연산은 미분, +, -, vector product, scalar product이고 나누기 연산은 없다. 자세한 내용은 Elber (1992)를 참고 하기 바란다.

동일한 가우스 곡률값을 갖는 등곡률선을 찾기 위해 상징연산으로 곡면의 곡률곡면을 계산하고 Interval Projected Polyhedron (Sherbrooke & Patrikalakis, 1993) 를 이용해 시작점을 계산한 다음, 상미분방정식(runge-kutta)을 이용해 등곡률선을 계산하였다.

Nam (2003)은 곡면의 형상질문(shape interrogation)에 대한 연구로 가우스 곡률을 계산하여 계산된 값을 곡면으로 근사하여 곡률곡면(곡률값이 곡면상의 점으로 표현된 곡면)을 얻었고 평면과 곡률곡면의 교차계산으로 등곡률선을 계산하였다. 교차를 통해 얻어진 등곡률선의 품질은 곡률곡면을 얼마나 정확히 계산하느냐에 달려있다. 곡률의 분포가 단순한 경우는 매우 효율적일 수 있으나 곡률의 분포가 복잡한 곡면의 경우 적용하기 어렵고 곡률곡면을 계산하는 과정에서 곡면의 곡률분포를 제대로 반영하지 못할 수도 있다.

Seong (2005)은 식의 개수보다 변수가 한 개에서 두 개 많은 특수한 형태의 문제를 풀이할 수 있는 방법을 제안했다. 곡률곡

면과 등곡률선을 계산하는 방법에 관한 기존연구와 달리 곡률곡면과 유사한 형태의 식을 계산하는 방법에 관해 연구했다. 그는 식과 도메인(해를 포함하고 있는 구간)이 존재하는 경우 도메인을 분할해 서브도메인이 해를 포함하는 경우 서브도메인간의 연결관계를 이용해서 해를 계산했다.

본 논문은 사각형 곡면이 주어진 경우 변곡점의 존재 유무를 판단하는 방법에 대해 논의하고자 한다. 이를 위한 본 논문의 구성은 선체외판 가공정보, 변곡점의 계산 방법, 비교 그리고 결론으로 구성된다.

2. 선체외판 가공정보

선체외판 곡면의 가공방법은 여러 가지 기준에 의해 분류될 수 있다. 미분기하학적으로는 가우스 곡률과 평균 곡률을 이용할 수 있고, 변곡선의 존재유무를 이용할 수 있다. 다른 하나는 재료의 성질변화, 판의 변형, 판의 두께 그리고 가열선의 가열순서 등을 이용할 수 있다.

가우스 곡률과 평균곡률이 각각 '0'보다 크고 '0'이 아닌 경우 전개 시 수축, 팽창이 발생한다. 이를 변형률(Fig. 1)을 통해 비교해 보면 전개면의 경계부에 변형률이 전개면내부의 변형률에 비해 그 크기가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 성형 시 전개형상의 경계선 부근에서 수축과 팽창이 많이 발생하는 가공방법의 적용이 요구된다. 이러한 특성에 따라 1차 냉간 가공 후 2차 열간 가공 시 가공 형상의 경계부를 삼각형 형태로 가열하는 성형가공을 진행한다.

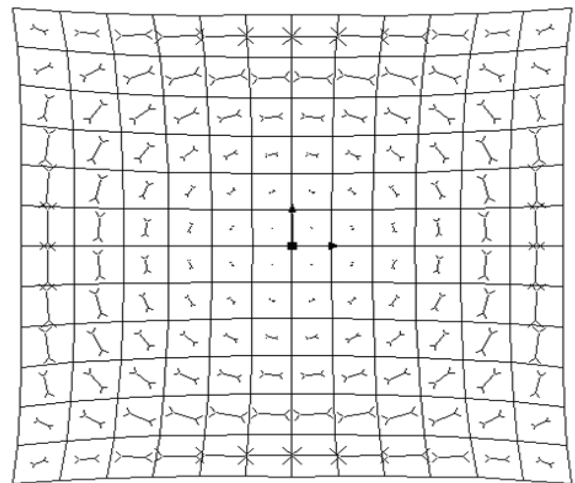


Fig. 1 Plotting in-plane strain convex surface (Ryu, 2002)

가우스 곡률과 평균곡률이 각각 '0'보다 작고 '0'이 아닌 경우 전개 시 수축, 팽창이 발생한다. 이를 변형률(Fig. 2)을 통해 비교해 보면 전개면의 내부가 전개면 경계부에 비해 그 크기가 큰 것을 알 수 있다. 성형 시에 전개형상의 내부에서 수축과 팽창이 많이 발생하는 성형방법의 적용이 요구된다. 따라서 1차 냉간 가

공 후 2차 열간가공 시 가공 형상의 내부를 선가열 형태로 가열하여 원하는 형상에 대한 성형을 진행한다.

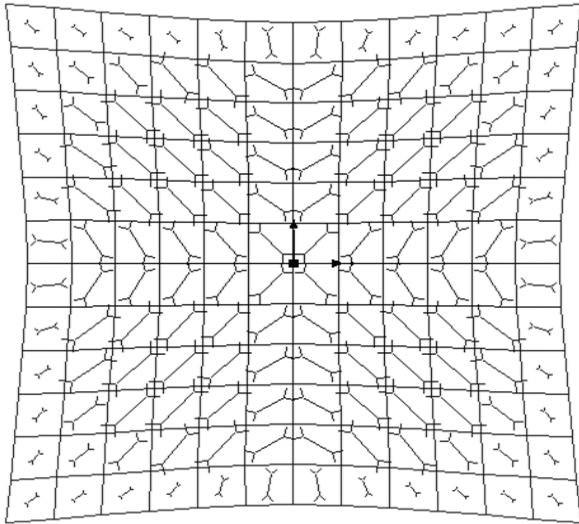


Fig. 2 Plotting in-plane strain saddle surface (Ryu, 2002)

가우스 곡률과 평균곡률이 각각 '0'이고 '0'이 아닌 경우 전개 시 수축, 팽창 발생하지 않는다. 이 경우 성형 시에 전개형상의 전체에 걸쳐 한쪽 방향으로만 굽혀지는 성형방법에 적용이 요구된다. 따라서 1차 냉간가공만 적용하여 원하는 형상에 대한 성형을 진행한다. 가우스 곡률과 평균곡률이 각각 '0'인 경우 전개 시 수축, 팽창 발생하지 않는다. 따라서 평면으로 분류 할 수 있고 별도의 가공법을 적용하지 않는다.

Fig. 1은 볼록형 곡면을 전개하여 전개면을 여러 개의 요소로 분할하여 요소의 중앙에서 면내 변형률을 표시한 것이다. 요소 중앙에 막대의 크기는 변형률의 크기를 의미한다. 표시된 막대의 방향은 전개형상을 성형가공 시 변형이 발생해야 하는 방향을 의미한다. Fig. 2는 안장형 곡면에 대해 Fig. 1과 동일한 방법으로 변형률을 나타낸 것이다.

변곡선이 있는 경우는 롤벤딩을 이용해 1차 냉간가공을 수행할 때 전개형상에 한쪽 면만 벤딩가공을 실시하지 않고 양쪽 면에 순차적으로 벤딩가공을 실시한다. 이후 삼각가열이나 선가열을 사용해 선체외판을 완성한다. 삼각가열 시 냉간가공과 동일하게 한쪽 면만 가열하지 않고 양쪽 면을 뒤집어 가면서 가열하게 된다. 이는 변곡선을 포함한 S곡이 볼록형 곡면 두 개를 서로 다른 방향으로 향한 상태에서 연결한 형태의 형상을 보이기 때문이다. 변곡선이 포함된 선체외판은 목적형상이 갖는 형상적인 특성으로 인해 변곡선이 없는 경우보다 성형가공과 성형 정도에 대한 평가가 상대적으로 어렵다. 따라서 선체외판을 분할하는 과정에서 S곡을 최대한 제거한다. Kim, et al. (2012)는 S곡을 제거하고 생산공수를 최대한 줄이는 선체외판에 대한 최적분할에 관한 방법을 제안한바 있다. Table 1은 미분기하학적인 기준에 의해 분류된 곡면의 가공방법을 정리한 것이다.

Table 1 Classification forming method for hull plate

Type of hull plate	Forming method
Convex type	Roll bending and Triangle-Heating
Saddle type	Roll bending, Line-Heating
Cylinder type	Roll bending
Plane type	None
Mixed type	Roll bending, Line-Heating and Triangle-Heating

가공 후 철판의 재료적인 성질이 변하는 가공방법과 변하지 않는 가공방법이 있다. 롤 벤딩을 이용한 냉간가공은 롤 벤딩 장비를 이용해 선체외판 전역에 나타나는 곡률을 점진적으로 굽힘으로써 성형하는 방법이다. 기계적인 힘을 이용한 성형방법이기 때문에 Springback이 존재한다. 따라서 한번에 원하는 형상으로 성형하는 것은 힘들다. 그러므로 여러 번에 걸쳐 철판을 굽혀 원하는 형상으로 완성한다. 1차 냉간가공은 기계적인 힘을 이용하므로 재료의 성질이 변하지 않는다.

장비가 갖는 기구학적인 특성으로 인해 롤 벤딩 장비가 굽힐 수 없을 정도로 작은 곡률반경을 갖는 선체외판의 경우 적용하기 어렵다. 따라서 성형에 필요한 변형을 전적으로 열적하중에 의존해 얻게 된다. 성형과정 중에 재료고유의 성질이 많이 변화하게 된다. 특히 선박의 선수와 선미에서 조립되는 선체외판에서 이러한 경향이 두드러지게 나타난다. 대체적으로 볼록형의 선체외판인 경우가 많고 선중에 따라 중앙평형부가 길고 선수와 선미에서 선형이 급격하게 변하는 유조선이나 벌크선의 선수선미 부분에서 그 경향이 상대적으로 뚜렷하다.

열간가공은 철판에 열을 가했을 때 가열부의 팽창과 냉각 후 수축 및 주변부의 저항을 응용한 성형방법이다. 성형과정에서 수축변형과 굽힘변형이 동시에 나타나는 가공방법이다. 이러한 특성은 용접구조물의 곡직(용접으로 변형이 발생한 철판의 표면을 다시 펴는 공정)과 역학적인 원리는 동일하다. 그러나 공정 자체가 의도하는 결과는 반대이다. 냉간가공이 전역적인 변형을 주목적인 가공방법이라면 열간가공은 국부적인 변형을 그 목적으로 한다. 열을 이용한 가공방법이므로 철판의 성질이 변화하는 단점이 있다.

열간가공은 대상 철판의 두께에 따라 그 방법이 조금씩 다르다. 철판의 두께가 선박의 건조 시에 주로 사용하는 두께 보다 상대적으로 얇은 철판의 경우 열간가공 시 가열부 두께 방향으로 열이 통과하여 가열부위를 중심으로 철판이 수축해 쭈굴쭈굴하게 변형되는 좌굴변형(buckling distortion)이 발생할 수 있다. 이를 감안해 성형과정에서 사용되는 가열장치의 열분출 압력을 조절하여 성형작업을 진행하게 된다. 반면 선박의 건조 시에 주로 사용하는 판의 두께 보다 상대적으로 두꺼운 판에 경우 한번의 가열로 변형이 충분히 유발될 수 있을 정도의 두께방향 깊이까지 열이 침투하기 어렵다. 따라서 가열장치의 열분출 압력과 가열부

에 가열장치가 머무르는 시간을 늘려서 가열부에 투입되는 열량을 증가시켜 가열하거나 가열부의 폭을 넓게 해주는 방법으로 가열한다. 전자의 경우는 변형이 철판에 유발되는 깊이까지 열이 전달되기 전에 철판이 녹아 내릴 수 있기 때문에 가열부에 일정량 이상의 열량은 사용하기 어렵다. 후자는 가열방법의 특성상 철판의 표면에 넓게 가열부가 자리하게 된다. 반면 가열부 집중으로 철판이 녹아내릴 가능성이 적기 때문에 상대적으로 두꺼운 판의 성형 시 선호되는 가열방법이다. Ha (2001)의 연구에 따르면 철판의 두께에 약 2/3이 되는 지점까지 열이 전달되어야 최대의 굽힘 변형을 유발시킬 수 있다고 알려져 있다. 곡면의 성형공정에서 사용되는 열원은 조선소에서 사용하는 가스열원 중 가장 큰 열량을 내는 것이다.

선체외판 곡면이 갖는 가우스 곡률의 부호가 섞여있는 경우 현장에서 실시하는 성형과정은 곡률이 음인 영역은 선가열을 통해 성형을 실시하고 양인 영역은 Turn-Over(곡면을 앞면과 뒷면의 위치를 바꾸는 공정)후 성형을 실시한다. 열간가공의 특성상 한번 열에 의해 변형이 철판에 발생하게 되면 발생된 변형을 원상태로 회복시키기 어렵기 때문에 선호되는 성형순서이다. 이를 자세히 보면 가우스 곡률이 음인 영역을 선가열로 성형을 진행하면 냉간 가공에서 성형한 형상이 다시 평평해지는 곡퍼짐 현상(Park, et al., 2008)이 발생하고 반대로 곡률이 양인 영역을 성형하게 되면 목적형상이 갖는 곡률보다 더 굽혀지는 현상(over bending)이 발생하게 된다. 평판으로 변한 것을 다시 곡면형상으로 수정하는 작업이 Over Bending된 판을 다시 펴는 것보다 상대적으로 그 작업성이 용이하므로 이러한 작업순서를 따른다고 볼 수 있다.

3. 변곡점의 계산

곡면은 미분기하학적으로 여러 가지 형태의 곡률을 계산하여 곡면의 기하학적인 특징을 찾아 볼 수 있다.

주 곡률(principal curvature)은 곡면의 형상을 구성하는 가상에 두 곡선의 곡률(k_1, k_2)을 의미한다. 볼록형 곡면과 안장형 곡면에 대해 동일한 방향과 크기를 갖는 주 곡률을 연결해 보면 볼록형 곡면은 중앙의 한 점에서 무수히 많은 주 곡률선이 통과하는 형태를 보인다. 반면 안장형 곡면은 바둑판 모양으로 주 곡률선이 계산되는 것을 확인할 수 있다. 또 주 곡률선은 곡면상의 한 점을 항상 수직하게 만나는 것을 확인 할 수 있다. 볼록형 곡면의 중앙에서 무수히 많은 주 곡률선이 통과하는 이유는 주 곡률의 크기와 방향이 동일하기 때문이다. 무수히 많은 주 곡률선이 통과하는 점을 미분기하학에서 umbilic point라 하고 두 개의 곡면이 서로 유사한지 비교할 때 이용하기도 한다. 평면과 구는 표면 전체가 umbilic point 이다.

Fig. 3은 안장형 곡면의 주 곡률선을 계산한 결과이고 앞에서 논의한 바와 같이 주 곡률선의 형상이 바둑판 모양을 띤다. Fig. 4는 볼록형 곡면의 주 곡률선을 계산한 결과이고 앞에서 언급한 바와 같이 곡면의 중앙점을 많은 주 곡률선이 통과한다.

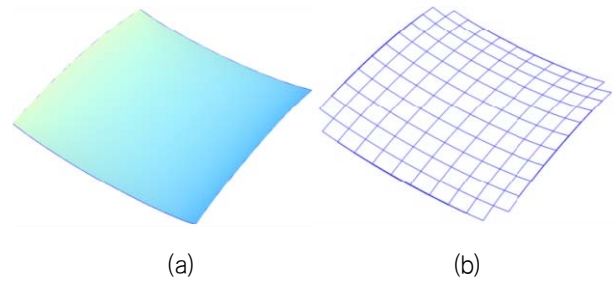


Fig. 3 Saddle surface and principal curvature lines((a) model surface, (b) principal curvature line)

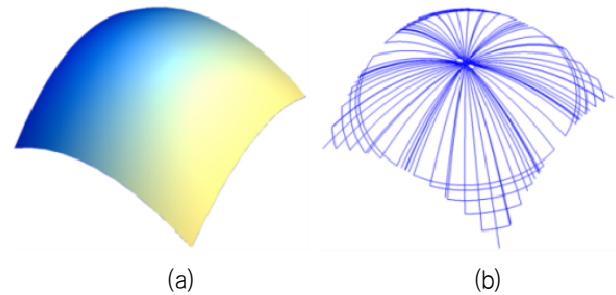


Fig. 4 Convex surface and principal curvature lines((a) model surface, (b) principal curvature line)

가우스 곡률(Gaussian curvature)은 주 곡률의 곱으로 표현되며 계산된 곡률이 갖는 부호에 따라 주어진 곡면의 형상적인 특징을 알 수 있다. 먼저 가우스 곡률이 양인 경우 볼록형 곡면으로 판정되고 음인 경우는 안장형 곡면으로 판정된다.

평균 곡률(mean curvature)은 주 곡률의 평균을 의미하고 평판과 전개가능 곡면의 판정 시에 사용할 수 있다. 평면이 아니면서 평균곡률이 '0'인 곡면을 Minimal Surface(극소 곡면: 주 곡률의 크기가 동일하고 그 부호가 달라 곡면의 모든 영역에서 평균 곡률이 '0'이 되는 곡면)로 정의한다. 극소 곡면은 동일한 형상을 만들 때 최소 표면적을 갖는 곡면이고 비누 거품 막이 그 한 예이다.

법선 곡률(normal curvature)은 곡면 위에 점 P를 지나가는 가상의 곡선 C(t)가 있을 때 점 P에서 곡률벡터 T'을 계산하여 점 P의 법선 u에 T'를 정사영 시킨 후 다시 U방향의 성분을 계산한 것이다.

$$r(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_i^n(u) B_j^m(v) \tag{1}$$

식 (1)의 $r(u, v)$ 는 각각 Bezier곡면을 나타내는 식으로 $P_{i,j}$ 는 곡면을 표현하는 조정점이고 $B_i^n(u)$ 과 $B_j^m(v)$ 는 Bezier곡면에서 조정점의 영향도를 조합하여 곡면상의 점을 계산하는 기저함수이다.

$$\begin{aligned} S &= r_u * r_v \\ S &= r_{uu} * r_v + r_u * r_{vu} \\ S &= r_{uv} * r_u + r_u * r_{vv} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{r}_u \cdot \mathbf{r}_u, E_u = 2^* \mathbf{r}_{uu} \cdot \mathbf{r}_u, \\ E_v &= 2\mathbf{r}_u \cdot \mathbf{r}_{uv} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} G &= \mathbf{r}_v \cdot \mathbf{r}_v, G_u = 2^* \mathbf{r}_v \cdot \mathbf{r}_{uv}, \\ G_v &= 2\mathbf{r}_v \cdot \mathbf{r}_{vv} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F &= \mathbf{r}_u \cdot \mathbf{r}_v \\ \begin{pmatrix} F_u &= \mathbf{r}_v \cdot \mathbf{r}_{vu} + \mathbf{r}_u \cdot \mathbf{r}_{uv} \\ F_v &= \mathbf{r}_{uv} \cdot \mathbf{r}_v + \mathbf{r}_u \cdot \mathbf{r}_{vv} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{r}_{uu} \quad (6)$$

$$M = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{r}_{uv} \quad (7)$$

$$N = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{r}_{vv} \quad (8)$$

$$k_n = \frac{L\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + 2M\left(\frac{du}{dt}\right)\left(\frac{dv}{dt}\right) + N\left(\frac{dv}{dt}\right)^2}{E\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + 2F\left(\frac{du}{dt}\right)\left(\frac{dv}{dt}\right) + G\left(\frac{dv}{dt}\right)^2} \quad (9)$$

식 (2)는 곡면의 법선 곡면을 표현하는 식이고, 식 (2)에서 사용한 $\mathbf{r}_u, \mathbf{r}_v$ 은 파라메트릭 곡면식의 도메인을 구성하는 각각의 매개변수 방향으로 한번씩 편미분한 식이다. 식 (3), 식 (4), 식 (5)는 곡면의 first fundamental form이고, 식 (6), 식 (7), 식 (8)는 곡면의 second fundamental form이다. 식 (9)은 법곡률을 나타낸다. 식 (1)~식 (9)는 Patrikalakis and Maekawa (2002)를 참조했다.

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \\ k_n = \frac{L\left(\frac{du}{dt}\right)^2}{E\left(\frac{du}{dt}\right)^2} \end{cases} \quad (10)$$

$$k_n = \frac{L}{E} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = 0 \\ k_n = \frac{N\left(\frac{dv}{dt}\right)^2}{G\left(\frac{dv}{dt}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

(10)는 곡면의 매개변수(u, v)식이 주어진 경우 한쪽 (v) 매개변수를 고정하고 나머지(u)만 변화시킬 때 법선 곡률을 계산

하는 식을 나타낸 것이다. 식 (11)은 식 (10)에서 $\left(\frac{du}{dt}\right)^2$ 를 분모와 분자 소거해 주면 얻을 수 있다. 식 (9)의 $\frac{du}{dt}$ 과 $\frac{dv}{dt}$ 는 법선 곡률을 계산하는 가상 곡선의 매개변수와 곡면의 매개변수가 변화하는 비율을 나타낸다. 식 (13)은 식 (12)에서 $\left(\frac{dv}{dt}\right)^2$ 를 분모와 분자에서 소거해 주면 얻을 수 있다.

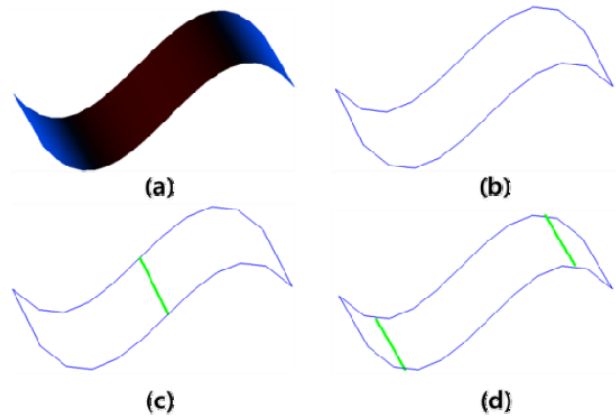


Fig. 5 Normal curvature Inflection line((a) model surface, (b) model surface boundary line, (c) inflection line of model surface, (d) stationary point of model surface)

Fig. 5은 법선 곡률의 변곡점을 가진 곡면을 나타낸 것이다. (c)는 식 (11)또는 식 (13)이 '0'이 되는 점을 계산한 것이다. (d)는 법선 곡률의 극대/극소점이다.

식 (11)과 식 (13)이 '0'인 상태를 계산하기 위해서 E 와 G 의 절대 값이 항상 '0'보다 큰 것으로 가정하여 분모를 생략하고 왼쪽 항에 있는 법선 곡률을 '0'으로 하면 식 (14)와 식 (15)를 최종식으로 얻을 수 있다.

$$L = 0 \quad (14)$$

$$N = 0 \quad (15)$$

식 (14)과 식 (15)는 Symbolic Operation를 통해 하나의 식에 형태로 변환하면 변수의 개수가 두 개이고 식은 한 개인 형태가 된다. 이런 경우 찾고자 하는 해의 형태는 일반적으로 선의 형태를 띠게 된다. 본 논문에서는 식 (14)와 식 (15)를 Seong (2005)이 제안한 방법을 이용해 계산하면 변곡선을 얻는다.

4. 변곡선 계산 결과 비교

3장에서 논의한 변곡선 계산 방법을 이용해 실제 건조된 선박의 분할된 선체외판 곡면의 변곡선을 계산한다. 이를 통해 분할된 선체외판 곡면의 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 변곡선을 계산하여 변곡선이 위치하는 영역정보를 이용해 분할된 선체

외판 곡면의 분할 적합성을 확인한다. 본 논문에서 사용하는 분할 적합성은 분할된 곡면의 성형가공 시 작업의 효율성과 생산성을 의미한다. 다양한 기준이 있으나 본 연구에서 적용하는 판단 기준은 계산된 변곡선의 위치가 곡면의 중앙을 관통하는지와 변곡선의 개수이다.

변곡선이 곡면을 관통하는지 여부를 판단기준으로 한 것은 변곡선을 중심으로 냉간가공 축이 배치되게 된다. 그 결과 롤 벤딩 작업 시 굽혀져야 하는 부분의 폭이 좁아질 수 있기 때문이다. 작업의 용이성 측면을 판단하는 기준으로 선택했다. 변곡선의 개수는 변곡선을 기준으로 롤 벤딩 작업을 수행할 때 여러 번 실시해야 한다. 따라서 분할된 곡면의 생산성을 판단하는 기준의 하나로 선택했다.

Fig. 6은 판의 길이 방향으로 변곡선이 관통하고 있는 형상을 보인다. 이 경우 성형가공 시 롤 벤딩 가공을 곡면의 양쪽 면에서 진행해야 된다. 따라서 1차 냉간가공 측면에서 매우 까다로운 형상이 될 수 있다. Fig. 7은 판의 경계부분에 약간 변곡선이 보인다. 성형가공 시 무시 할 만한 변곡선으로 볼 수 있고 분할된 곡면의 성형작업 효율성이 높다고 볼 수 있다. Fig. 8은 판의 전체에서 한 개 이상의 변곡선이 있다. 따라서 성형가공 시 매우 까다로운 판이 될 수 있다. Fig. 9은 판의 전체에서 한 개 이상의 변곡선이 있다. 그러나 전체 크기에 비해 변곡선의 길이가 짧고 그 부위가 판의 경계에 있기 때문에 성형가공 측면에서 크게 영향이 없다고 볼 수 있다. Fig. 10은 판의 폭 방향으로 변곡선이 관통한다. 따라서 성형 시 필요한 공수가 높을 수 있다. 따라서 선체외판에 대한 분할 품질은 낮다고 할 수 있다.

계산된 변곡선의 위치를 이용해 분할된 선체외판 곡면에 대한 품질을 비교했다. 그러나 변곡선을 중심으로 한쪽 면이 갖는 법선 곡률의 크기가 매우 작다면 변곡선이 위치한 영역과 그 개수로 가공 효율성을 비교한 것은 의미가 없을 수도 있다. 그러므로 본 연구를 통해 제안된 방법은 선체외판 곡면에 대한 정성적인 가공성 판단을 위한 변곡선 계산 기법이라 할 수 있다.

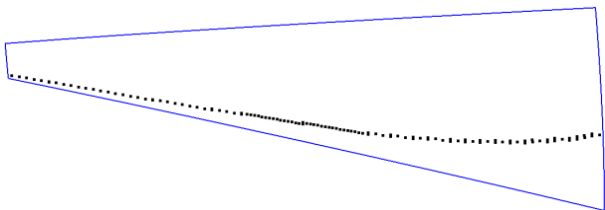


Fig. 6 Model surface1(solid line) and inflection line (dot line)

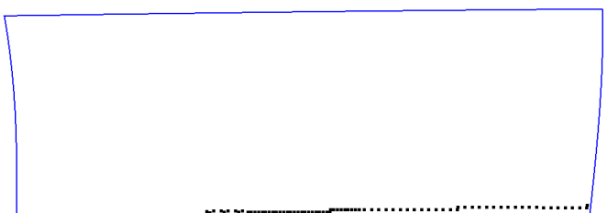


Fig. 7 Model surface2 (solid line) and inflection line (dot Line)

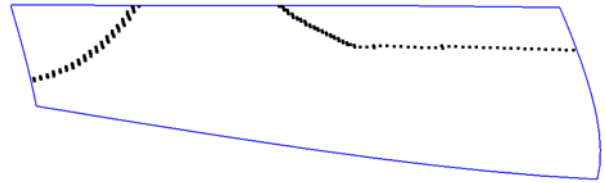


Fig. 8 Model surface3 (solid line) and inflection line (dot line)



Fig. 9 Model surface4 (solid line) and inflection line (dot line)

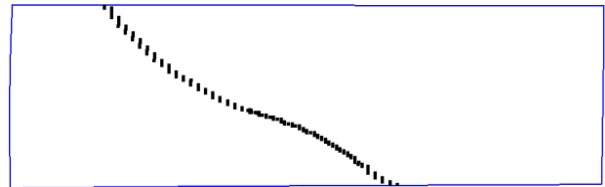


Fig. 10 Model surface5 (solid line) and inflection line (dot line)

5. 결론

본 논문은 기존의 냉간가공 정보의 계산방법을 개선하기 위한 방안으로 하나로 선체외판 곡면이 변곡선을 포함하고 있는 경우 이를 계산하는 방법에 대한 연구를 진행했다.

기존에 변곡선을 선체외판 가공과 관련한 연구에서 기본 수식만 정의하고 구체적인 계산방법에 대한 논의가 없었다. 본 논문은 법곡률식에 대한 분석을 통해 식을 단순화 하고 단순화된 식을 계산할 수 있는 방법을 소개했다.

실제가공에 사용된 선체외판 정보를 이용해 변곡선에 대한 유무를 판단하는 계산을 실시하여 그 결과를 보였다. 또 몇 가지 평가 기준을 사용해 분할된 곡면의 냉간가공 시 가공의 용이성과 생산성을 비교해 보았다.

향후 연구로는 변곡선의 정보를 이용해 냉간가공 정보를 고도화 하는 방안으로 대한 연구와 선종 별로 변곡선이 위치한 곡면의 비율을 계산할 필요가 있다. 마지막으로 변곡선 계산 결과 비교에서 언급한 바와 같이 제안된 방법이 좀더 정량적인 의미를 갖기 위해서는 변곡선을 기준으로 분할된 두 영역에서 법곡률의 극

대/극소 점에 대한 계산이 필요하다. 범곡률의 극대/극소 점에 대한 정보를 얻게 되면 이를 통해 S곡의 정도까지 확인할 수 있게 된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업 "중소형조선소 시뮬레이션기반 생산관리 시스템 개발" 과제 (과제번호:10050495)의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

References

Elber, G., 1992. *Free form surface analysis using a hybrid of symbolic and numeric computation*. Ph.D. Thesis. Department of Computer Science, University of Utah

Kim, J. Park, J. S. Park, T.Z. Shin, J.G. & Ko, K.H., 2012. Optimum Subdivision of Curved Hull Plates for Efficient Ship Manufacture using Minimum Strain Energy. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(7), pp.608-624.

Kim, Y.I. Shin, J.G. & Lee, J.H., 1996. Analysis of Ship Hull Plate Bending By Roll Bending Machine. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(4), pp.142-149.

Ha, Y.S., 2001. *A study on the prediction of plate deformation by heating of weaving path in thick plate bending*. Master's Thesis. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University.

Maekawa, T. & Patrikalakis, N.M., 1994. Interrogation of Differential Geometry Properties for Design and Manufacture. *The Visual Computer*, 10(4), pp. 213-237.

Nam, J.H., 2003. Computation of Section Curves, Reflection Characteristic Lines and Asymptotic Curves for Visualization. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 8(4), pp.262-269.

Park, J.S. Kim, J. Shin, J.G. Hyun, C.M. Doh, Y.C. & Ko, K.H., 2008. Plate Flattening Analysis in Line Heating Process using Bending Strains. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(4), pp. 417-425.

Park, T.J., 1997. *Forming information of the first roll bending process by a statistical approach*. Master's Thesis. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University.

Patrikalakis, N.M. & Maekawa, T., 2002. *Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing*. Springer Verlag: Heidelberg.

Ryu, C.H., 2002. *A Consistent algorithm for unfolded flat shape of curved ship's hull shells by minimizing strain energy*. Ph.D. Thesis. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

Ryu, C.H. Lee, J.H. & Yun, J.S., 2007. An Algorithm on Determination of Process Parameters for Roller Bending of Curved Shell Plates. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(5), pp. 517-525.

Seong, J.K., 2005. *Problem reduction scheme for solving geometric constraints and its applications*. Ph.D. Thesis. Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University

Sherbrooke, E.C. & Patrikalakis, N.M., 1993. Computation of the Solutions of Nonlinear Polynomial Systems. *Computer Aided Geometric Design*, 10(5), pp. 379-405.

Yun, D.K. Shin, J.G. & Ryu, C.H., 1999. A Determination of Approximated Cylindrical Surfaces of Doubly Curved Surfaces for the Least Line Heating. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(3), pp.134-143.

