

곡가공 공정에서 기하학적 접근법에 의한 2차원 성형에 관한 연구

성우제* · 안준수* · 김현욱** · 나석주*†

*KAIST 기계공학과

**대우조선해양 (주) 산업기술 연구소

A Study on Two-Dimensional Forming of Ship Hull Plate by Geometrical Approach

Woo-Jae Seong*, Junsu Ahn*, Hyun-Uk Kim** and Suck-Joo Na*†

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Industrial Application R&D Institute, DaeWoo Shipbuilding & Marine Eng.Co.Ltd,
Geoje-si 656-714, Korea

†Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received August 26, 2008 ; Revised September 29, 2008 ; Accepted March 18, 2009)

Abstract

In shipyard, plate forming is widely used to form the ship hull plate in various shapes. Line heating method by using a flame torch is one of the major shipbuilding processes carried out by skilled workers. Since the forming characteristics depend upon their experiences in manual forming, there are much variations between products and difficulties in communication between engineers and workers. Hence, it needs to develop an automatic forming system which can not only reduce the working time and rework costs but also improve the working environment and hull forming productivity. One of the final goals of plate forming automation is to form a target shape from the initial plate automatically. For automated plate forming, it is required to determine where and how to heat on the plate. To realize this procedure, the inverse problem should be first solved and the effect of curvature shape formed at the heating path should be investigated. In this study, the inverse problem was solved by geometrical approach using the relationship between bending angle and radius of curvature of the curved shape. In addition, experiments of two-dimensional plate forming were performed with the distance-based method considering the curved bending with curvature. The result of the formed shape agreed considerably well with the target shape.

Key Words : Ship hull plate, Plate forming, Line heating, Automation, Inverse problem

1. 서 론

대형 선박의 선각(ship hull)은 많은 수의 곡판이 용접되어 구성되어 있다. 이러한 선각을 제조하기 위한 강판의 곡가공(plate forming)은 건조 공정에서 상당히 중요한 위치를 차지하고 있으며 공정방법에는 크게 냉간 가공과 열 가공이 있다.

열가공을 위한 선상가열법(line heating method)은 평판상에서 직선으로 움직이는 열원으로 재료를 가열하는 공정을 말하며 많은 조선소에서는 이 방법을 사용하

여 곡가공을 실시하고 있다. 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공은 이론적인 측면에서 복잡한 역학적 문제이나, 지금까지의 공정은 전문 숙련공의 경험과 감각을 바탕으로 작업하고 이를 전수하는 방식에 의존하여 왔다. 하지만 숙련공들의 고령화 및 수적 감소 추세와 기능의 계승을 위한 장기간의 교육 및 숙련의 필요성으로 인하여 어려움이 많은 실정이다. 따라서 효율적인 생산과 비용절감, 기능의 원활한 계승 및 작업환경을 개선하고 보다 생산성 높은 고품질의 제품을 생산하고자 자동화 기술개발의 필요성이 요구되며 이에 관한 많은 연

구가 이루어지고 있다^{1,2)}.

본 연구에서는 곡가공 자동화를 위해 기존의 레이저 성형에서 사용되었던 방법을 도입하여³⁾ 목표형상으로부터 기하학적 접근법으로 가공을 위한 제어변수를 추출하는 역문제(inverse problem) 해결방법을 제시한다. 이를 위해 선상가열 실험을 수행하여 각 제어변수에 따른 변형량(성형각도)에 대한 정보를 획득하고 이는 역으로 제어변수를 도출하기 위한 데이터로 이용되었다. 화염 열원의 경우 변형된 구간에 곡률을 가진 완전한 곡 변형구간이 존재하므로 이러한 영향을 고려하여 성형전략을 도출하는 방법을 제시하며 이를 실제 2차원 곡 성형에 적용하였다.

2. 2차원 성형을 위한 기하학적 접근법

Fig. 1은 2차원 성형에 대한 간략도를 나타낸다. 그림과 같이 성형될 곡판의 형상을 y-z평면으로 투영하고 곡판의 중립면을 2차원 곡선으로 정의한다면, 본 문제는 2차원 곡선문제로 다룰 수 있다. 이때 구해야 하는 실제 가열선(heating path)의 위치는 점으로 대표할 수 있으며 본 연구에서는 성형점(forming point)이란 용어를 사용한다.

Fig. 2는 본 연구에서의 목표형상을 나타낸다. 평판을 위 그림과 같은 목표형상으로 성형하기 위해 가열선의 위치를 결정해야 하며 각 가열선에서 변형되어야 할 정도를 나타내는 성형각도(forming angle)를 결정해야 한다. 이는 다음과 같은 기하학적 접근법을 통해 자동으로 추출할 수 있다.

3. 공정변수 도출을 위한 기하학적 접근법

3.1 거리기준 방법

거리 기준 방법은 주어진 재료와 목표 형상과의 최대 거리를 성형 기준으로 삼는다. 즉 현재의 형상과 목표

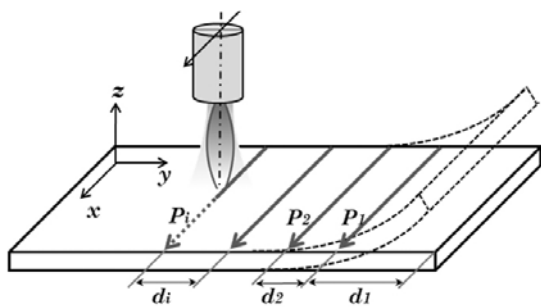


Fig. 1 schematic diagram of 2D plate forming process

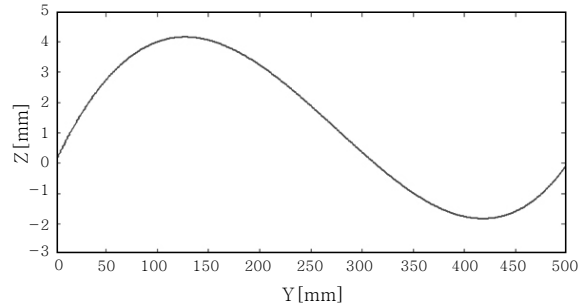


Fig. 2 Target shape: cubic spline curve

형상과의 최대거리를 계산하여, 미리 설정한 기준 거리 (offset distance)보다 클 경우 새로운 성형점을 만들게 된다. Fig. 3과 Fig. 4는 이 방법에 대한 설명과 그 과정을 나타낸 그림이며 세부 절차는 다음과 같다. 이때 위 첨자 k는 각 공정변수들이 반복계산 (iteration)에 의해 이동하거나 변화된 횟수를 의미하고 아래 첨자 i, j는 각 공정변수의 생성된 번호를 의미하게 된다.

- 1) 기준 거리 h_{offset} 을 정한다.
- 2) 양 끝점을 최초 성형점 P_i^k, P_{i+1}^k 으로 설정하고 이때 양 끝점을 이은 직선은 가공될 예상 형상이다.
- 3) P_i^k 에서 시작하여 가공 예상 형상과 목표형상과의 거리 h_j 를 계산한다.
- 4) h_j 가 최대가 될 때 목표형상 위의 점을 찾는다.
- 5) 위에서 찾은 점이 h_{offset} 보다 클 경우 이 점을 새로운 성형점 P_{i+2}^k 으로 설정한다.
- 6) 모든 h_j 가 h_{offset} 보다 작을 때까지 3-4번 과정을 반

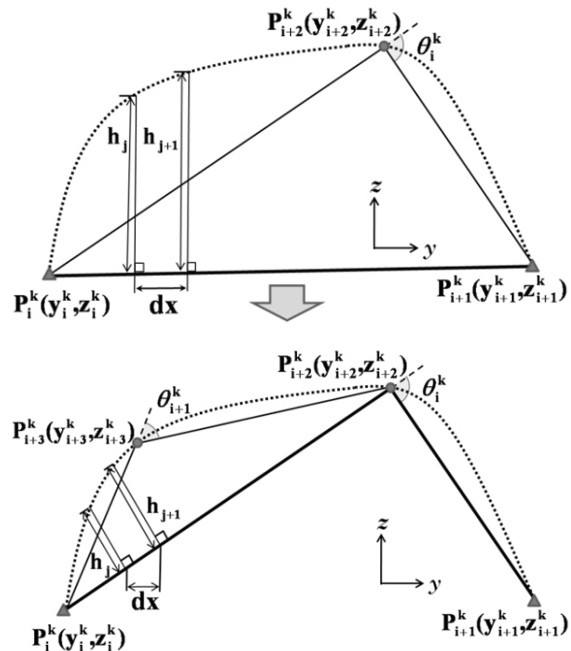


Fig. 3 Procedure of distance-based criterion method

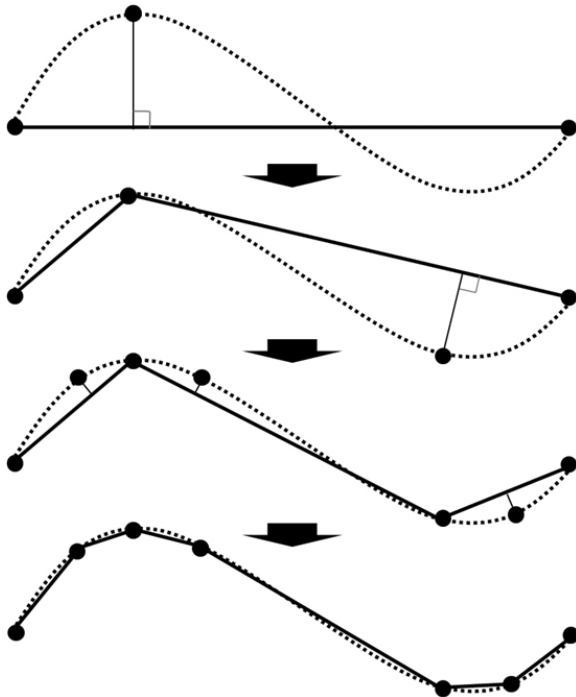


Fig. 4 Schematic diagram of distance-based criterion method

복한다.

- 7) 구해진 성형점들 사이의 거리 d_i^k 와 성형각도 θ_i^k 를 계산한다.

위의 방법은 기존의 레이저 성형에 관한 연구에서 적용했던 방법이다. 하지만 화염 열원의 경우 가열 부위에서 등근 곡 변형을 보이므로 단순히 몇 개의 직선들의 조합으로 실제 가공형상을 가정하기 어렵다. 본 연구에서는 가열 부위에서 생긴 이러한 곡 변형을 곡률반경을 가진 호로 가정하여 다음과 같은 방법으로 기하학적 영향을 고려하였다.

3.2 곡변형을 고려한 거리기준 방법

Fig. 5는 거리기준 방법에 곡 변형의 영향을 고려한 방법을 보여주며 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 거리기준 방법을 통해 구한 최종 성형점 P_i^k 과 성형각도 θ_i^k 를 초기값으로 사용한다.
- 2) 실험 및 해석결과로부터 얻은 성형 각도와 곡률반경에 대한 관계를 통해 각 성형점에서의 성형각도 θ_i^k 에 대응하는 곡률반경 R_i^k 을 얻는다.
- 3) 각 성형점들 위에 목표형상과 접하고 곡률반경 R_i^k 를 가진 가상의 원을 그리고, 인접한 가상의 원과의 공통접선을 그려 곡률을 가진 새로운 변형 형상을

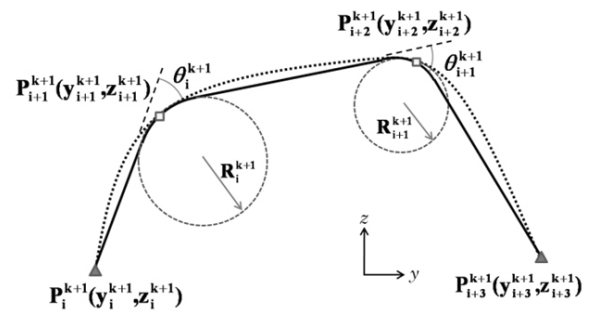
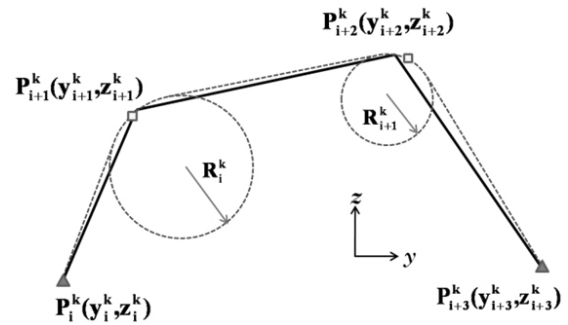
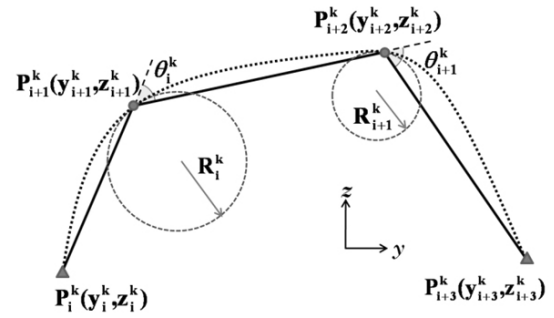
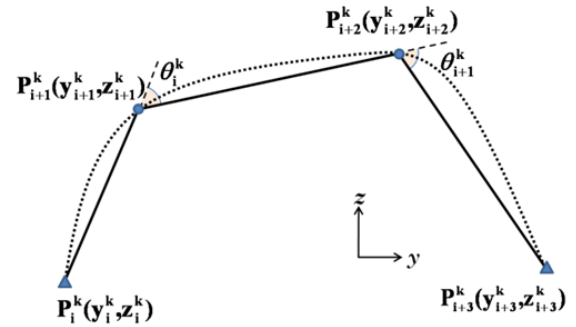


Fig. 5 Procedure of distance-based criterion method

얻는다. 새로운 형상은 이들 공통접선과 각 성형점 부근에서 곡률반경을 가진 곡 변형 형상을 이룬다.

- 4) 각 곡 변형 형상의 중간 지점을 새로운 성형점 P_i^{k+1} 으로 설정하고 인접한 두 공통접선 사이의 각을 새로운 성형각도 θ_i^{k+1} 로 정한다.
- 5) 새로운 성형각도 θ_i^{k+1} 로부터 또 다른 곡률반경 R_i^{k+1} 을 얻는다.

6) 2 ~ 5번까지의 과정을 수렴시까지 반복한다.

Fig. 6은 거리기준 방법에 의해 계산된 가공될 형상과 그때의 성형점을 실제 계산을 통해 나타내었다. 그림에서 스플라인 곡선은 목표형상을 나타낸다. 성형점은 7개가 생성되는 조건으로 기준 거리 h_{offset} 를 조절하여 결정하였다. 그림에서 보듯이 이 방법은 가공형상은 곡선의 곡률 중심으로부터 목표형상보다 안쪽에 생성됨을 알 수 있다. Fig. 7은 곡변형을 고려한 결과로 성형점 부위에서 등근 곡변형을 보이고 목표형상과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 선상가열 실험 및 2차원 성형

지금까지 성형점의 위치와 그때 필요한 성형각도를 결정하는 방법에 대해 설명하였다. 도출된 성형점의 위치는 기하학적 좌표로부터 그 위치를 결정할 수 있다. 반면 성형각도로부터 공정을 위한 제어변수를 도출하기 위해서는 성형각도와 공정 제어변수와의 관계를 이용해야 하며 이는 실험을 통해 구할 수 있다.

4.1 실험조건

본 연구에서 사용되는 연소 가스는 산소와 프로판이며 유량은 각각 26 l/min, 91 l/min으로 현장 속련공

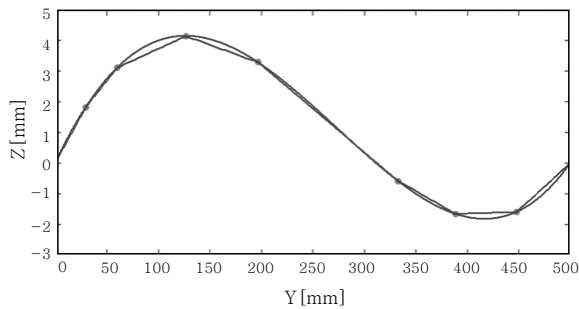


Fig. 6 Result of distance-based criterion method

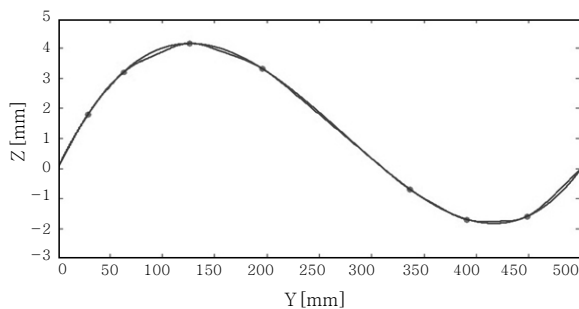


Fig. 7 Result of distance-based criterion method considering curvature

의 도움으로 불꽃을 조절한 후 측정하였다. 토치와 시편 사이의 거리는 52mm로 일정하게 유지하였고 시편은 500×500×12mm의 AH32 선체구조용 강재를 사용하였다. 모든 측정은 가열이 진행된 후 변형각도가 일정해지는, 시작단으로부터 거리가 350mm인 지점에서 측정하였다. Fig.8은 선상가열이 진행되는 과정을 보여주며 본 연구에서 사용될 곡률반경과 성형각도는 Fig. 9와 같이 정의하여 속도에 따른 각변형량(θ)과 그에 따른 곡률반경(R)의 변화를 측정하였다.

실험 조건으로 속도의 역수(s/mm)는 0.18 에서 0.06까지 0.02간격으로 결정하였으며 이때 속도는 5.56mm/s에서 16.67mm/s에 해당된다.

4.2 선상가열 실험

Fig. 10은 선에너지(line energy)에 따른 변형각도의 변화를 나타낸 결과이며 이때 선에너지는 유효열량(Q)을 속도(u)로 나눈 값이다. 사용된 유효열량은 일정한 값으로 측정된 유량과 화학식 및 열 변형 해석을 이용하여 구하였으며 그 값은 26815W이다⁴⁾. 결과에 따르면 6.25mm/s에서 12.5mm/s 까지의 범위 내에서 속도의 역수에 따라 각 변형량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 결과와 같이 속도의 증가에 따라 같은 구간에서 곡률반경이 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 반면 속도가 6.25mm/s 보다 느린

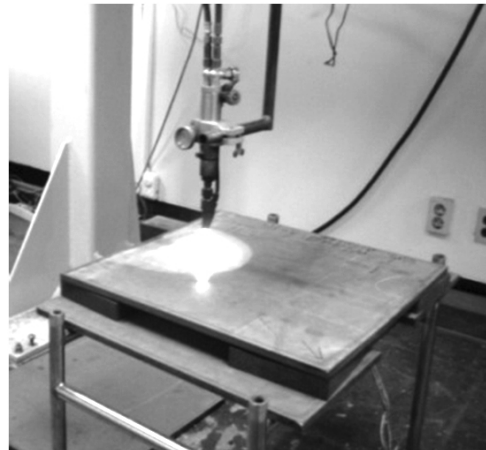


Fig. 8 Experiment by line heating

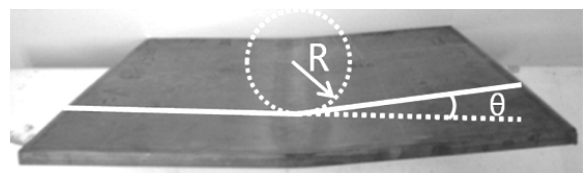


Fig. 9 Determination of process parameters

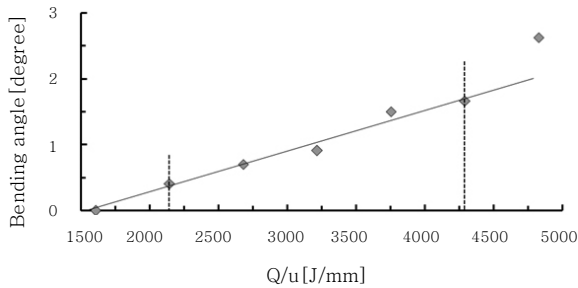


Fig. 10 Bending angle with line energy

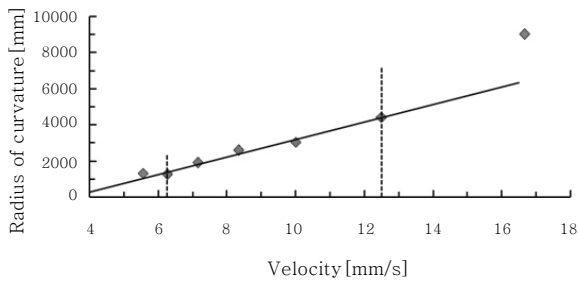


Fig. 11 Radius of curvature with travel speed

경우 많은 열 입력으로 인해 큰 열탄성 변형(thermo-elastic strain)이 발생하면서 변형각도가 비선형적으로 크게 증가하는 buckling mechanism에 의한 영향이 보다 크게 발생한 것으로 판단된다⁵⁾. 이와 동시에 종변형이 발생하여 가열 진행 방향의 위치에 따라 각변형량이 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 선형구간에서의 결과를 이용하며 이들 결과로부터 다음의 식 (4.1)과 같이 변형각과 곡률반경과의 관계를 도출할 수 있다.

$$R = \frac{35.89}{\theta} \tag{4.1}$$

4.3 2차원 성형

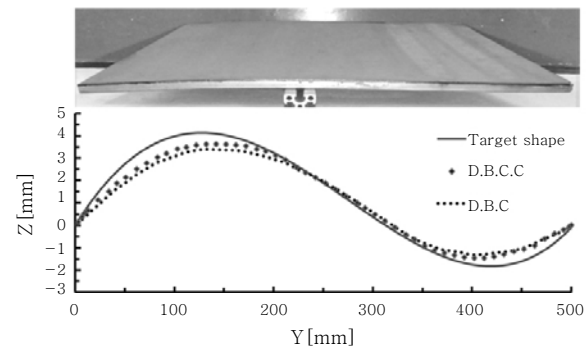
Table 1와 Table 2는 스플라인 형상과 위로 볼록한 비대칭 형상을 목표로 위에서 언급한 거리기준 방법에 의해 계산된 공정변수를 도출한 것이며 곡변형을 고려하였을 때와 그렇지 않았을 경우를 비교하여 나타내었다. 성형각에서 (-)부호는 판재의 아랫면에서 가열한다는 것을 의미한다. 이들 공정변수와 실험결과에서 얻은 성형각-속도와의 관계를 이용하여 가공에 필요한 변수인 성형점의 위치와 토치 이송속도를 구하여 실제 성형 실험을 실시하였다. Fig. 12와 Fig. 13는 스플라인 형상과 위로 볼록한 비대칭 형상을 목표형상으로 각각 실험

Table 1 Result of process parameters-spline curve shape

Without curvature		With curvature	
Forming angle [degree]	Forming point, Y [mm]	Forming angle [degree]	Forming point, Y [mm]
-1.13	26	-1.53	29
-1.54	68	-1.58	60
-1.58	126	-1.47	127
-0.93	194	-0.97	197
0.52	341	0.60	333
1.17	394	1.13	389
1.69	454	2.04	448
Total length	500	Total length	500

Table 2 Result of process parameters-convex shape

Without curvature		With curvature	
Forming angle [degree]	Forming point, Y [mm]	Forming angle [degree]	Forming point, Y [mm]
-1.88	50	-2.36	50
-1.69	110	-1.64	110
-1.49	160	-1.47	170
-1.37	220	-1.36	220
-1.16	280	-1.15	290
-1.06	350	-1.07	360
-1.04	421	-1.1	431
Total length	500	Total length	500



D.B.C. : Distance Based Criterion algorithm
 D.B.C.C. : Distance Based Criterion algorithm with Curvature

Fig. 12 Result of 2D-forming (spline curve shape)

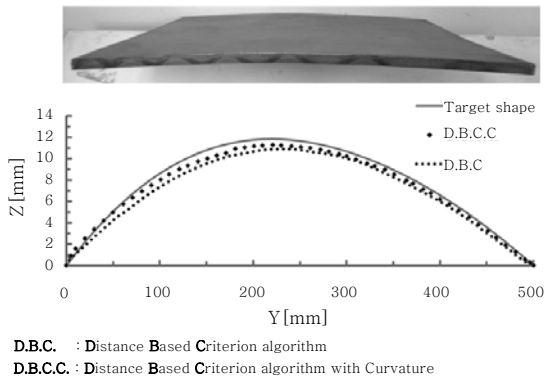


Fig. 13 Result of 2D-forming (convex shape)

험한 결과이며 그때의 측정값이다. 전체적으로 목표형상에 일치하는 경향을 보였으나 오차가 존재하며 이는 열변형 시 모서리 부근에서 발생하는 모서리 효과(edge effect)에 의해 굽힘이 덜 일어나고 그것이 누적되어 발생한 것으로 판단된다⁶⁾. 특히 스플라인 형상의 경우 첫 번째 성형점이 모서리에 가까이 존재하기 때문에 오차가 크게 발생한 것으로 보인다. 최대 오차는 스플라인 형상의 경우 Y가 120mm인 지점에서 곡변형을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 각각 13.4%와 23.1%로 나타났다. 볼록한 형상인 경우 Y가 170mm인 지점에서 곡변형을 고려한 우와 그렇지 않은 경우 각각 7.2%, 13.8%였다. 이러한 결과에 따르면 곡변형을 고려한 거리기준 방법이 곡변형을 고려하지 않는 방법보다 다소 향상된 결과를 보였고 이는 Table 1의 성형각도에서 보듯이 곡변형을 고려한 경우 더 큰 성형각을 필요로 하기 때문에 공급된 열입력의 차이로 나타난 결과로 볼 수 있다.

5. 결 론

임의의 형상을 곡가공하기 위한 기본단계로 2차원 목표형상으로부터 기하학적 접근방법으로 공정변수를 도출하여 이를 이용하여 곡가공을 실시하였으며 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 기하학적 접근방법으로 2차원 곡가공을 위한 공정변수의 자동 결정 방법을 제시하였다. 거리기준 방법에 곡변형을 고려하여 적용하였고 시뮬레이션 결과 예측형상이 목표형상과 거의 일치하였다. 이러한 방법은 목표형상의 곡률변화가 큰 부위에 성형점을 보다 집중시켜 가공에 용이한 조건의 가공변수를 추출하여 작업자에게 제공할 수 있다.

2) 곡변형을 고려한 거리기준 방법은 평판에서 목표형상으로 가공하기 위한 공정변수인 성형점의 위치와 성형각도, 곡률반경을 자동으로 결정한다.

3) 선상가열 실험을 실시하여 성형각도, 토치 이송속도 및 곡률반경과의 관계를 도출하였고 성형각도와 곡률반경은 실제 가공에 필요한 토치 이송속도를 구하는데 이용된다.

4) 구해진 성형점의 위치와 이송속도를 이용하여 2차원 성형을 실시하였다. 성형결과 목표형상과 거의 일치하는 결과를 보였으며 2차원의 성형의 경우 기하학적인 접근방법으로 성형이 가능함을 보였다. 누적오차의 가장 큰 원인으로 모서리효과를 들 수 있으며 이는 차후연구에 다루어질 예정이다.

5) 이러한 기하학적 접근을 통한 2차원 성형에 관한 연구는 임의의 3차원 형상을 가공하기 위한 차후 연구에 이용될 것이다.

후 기

본 연구는 BK21 및 대우조선해양 (주)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Okumoto, Y. and Kamichika, R. : Development of Computer-Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(Report2), Journal of Ship Production, 10 (1994), 239-247
2. Jang, C.D., Moon, S.C., : An algorithm to Determine Heating Lines for Plate Forming by Line Heating Method, Journal of Ship Production, 14 (1998), 238-245.
3. Kim J., Na S.J., Development of irradiation strategies for free curve laser forming : Optics and Laser Technology, 35 (2003), 605-611
4. Kang-Yul Bae, Young-Soo Yang, Chung-Min Hyun and Si-Hun Cho : Development of Simplified Formulas to Predict Deformations in Plate Bending Process with Oxy-Propane Gas Flame, J. KWJS, 4 (2007), 70-75 (in Korean)
5. Hu Z., Kovacevic R., Labudovic M. : Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming, Int J Machine Tools Manuf 42 (2002), 1427-1439
6. Bao J, Yao YL, : Analysis and Prediction of edge effects in laser bending, J. Manuf Sci Eng, 123 (2001) 53-61
7. Welding handbook, Vol2, 8th ed. American Welding Society, 1991