

선형 배열 롤 셋 공정에서의 중간 형상 설계

심도식¹, 양동열[#], 정성욱², 한명수²

Design of intermediate shape in line array roll set (LARS) process

D. S. Shim, D. Y. Yang, S. W. Chung, M. S. Han

Abstract

For the effective manufacture of doubly curved metal plates, a line array roll set (LARS) process is proposed. The suggested process utilizes a pair of upper and lower symmetric roll assemblies. In the process, the initial plate is progressed into the final shape in a stepwise or pathwise manner according to the basic principle of the incremental forming process. In this work, the intermediate shape which is closest to a final shape is proposed to fabricate the desired shape effectively in design of forming schedule. The intermediate shape has homogeneous curvature in a longitudinal and transverse direction so that it can be fabricated easily without complicated controls of rolls in the roll set. The method of approximation using genetic algorithm is proposed and applied to some actual ship hulls to evaluate the efficiency of the algorithm.

Key Words : Incremental forming process, ship hull plates, curvature

1. 서론

선박의 외판(Ship hull)은 단일 혹은 이중 곡률을 가지는 다양한 형상들로 이루어져 있다. 양동열 등은 생산성을 보다 향상시키기 위한 냉간 가공 방법으로 선형 배열 롤 셋(Line array roll set)을 이용한 점진적 성형 공정을 제안하였으며[1], 소규모 실험 장치를 이용한 공정 개발 연구를 진행 중에 있다[2]. 현재 조선 현장에서의 선박 외판(Ship hull) 가공 공정은 평판에서부터 롤 벤딩(Roll bending) 가공을 거쳐 단일 곡률을 가지는 실린더 형상으로 1 차 가공이 된 후, 토치(gas flame torch)에 의한 국부적 가열을 이용하여 수작업으로 진행되는 선상 가열 공정(Line heating process)을 이용한 2 차 가공을 통해 제작된다[3]. 여기서 선상 가열 가공을 이용한 최종 형상 성형 전, 롤 벤딩 공정으로 1 차 성형되는 실린더 형상이 최종 목적 곡면에 더욱 근접하여 성형될 경우, 작업자의 수

작업에 의해 가공되는 선상 가열 가공이 최소화되므로 가공 시간 및 생산 효율을 증가시킬 수 있게 된다.

본 공정에서도 선상 가열 공정과 유사한 방식으로 평판에서부터 최종 형상에 근접한 중간 형상(intermediate shape)으로의 1 차 성형을 거친 뒤 최종 형상으로 성형하는 성형 경로를 통해 이중 곡면을 제작하게 된다. 따라서 본 연구에서는 최종 목적 곡면에 가장 근접하는 중간 형상을 근사화시키기 위한 방법을 제안하고 알고리즘 적용을 통해 실용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 선형 배열 롤 셋 공정

선박용 외판의 냉간 곡가공을 위한 실험에 사용된 선형 배열 롤 셋은 Fig. 1과 같으며, 상하부에 배열된 구동롤(motor-driven roll)과 유힬롤(idle roll)에 의해 판재에 종방향과 횡방향으로 굽힘 변

1. KAIST 기계공학과

2. ㈜대우조선해양

교신저자: KAIST 기계공학과, dyyang@kaist.ac.kr

형을 발생시키며 구동롤의 회전에 의해 판재가 이송됨과 동시에 성형이 진행된다.

상하부 각각에 3열로 롤이 배열되어 있으며, 가운데 열은 판재의 이송을 위해 모터 구동이 가능한 구동롤로 구성되어 있으며, 그 외각의 두 열은 자유 회전이 가능한 유휴롤 열로 구성되어 있다. 또한 각각의 롤들은 상하 및 좌우 방향으로 이동이 가능하도록 하여, 다양한 형상의 제작에 적합하도록 유연성을 확보하였다.

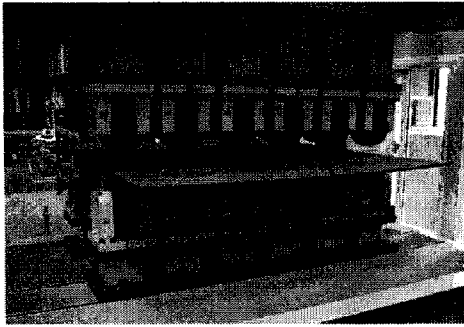


Fig. 1 Line array roll set system

2.2 중간 형상의 정의

Fig. 2는 이중 곡면 제작을 위한 전체적인 성형 과정을 보여 준다. 그림에서와 같이 최종 형상으로의 성형 전에 평판에서부터 중간 형상으로의 성형을 먼저 거치게 되는데, 이러한 최종 형상으로의 가이드 역할을 하게 되는 중간형상을 정의하는 주된 이유는 롤 높이 조절 등과 같은 공정 변수 제어의 용이성에 있다. 실제 조선 현장에서의 대부분의 최종 형상들은 복잡한 곡률 분포를 가지는 복합 곡면(compound surface)이기 때문에 최종 형상으로의 직접 성형을 위해서는 판재의 이송 동안 실시간으로 롤 높이의 제어가 필요하게 된다. 그러나 중간 형상의 경우 종방향과 횡방향으로 각각 일정한 곡률을 가진 균일 곡률의 형상으로 정의되므로 실제 성형 시 롤 높이의 실시간 제어가 필요 없이 각 롤들을 지정된 위치에 이동시킨 후 구동롤의 회전을 통해서 판재를 이송시키면 된다. 이와 같은 방식으로 예비 성형된 중간 형상은 다음 성형 단계에서 실시간 제어를 이용하여 최종 형상으로 성형되게 된다. 따라서 1차 가공으로 제작된 중간 형상이 최종 형상에 근접할수록 최종 형상 성형 시 발생할 수 있는 실시간 제어에 따른 오차가 감소할 수 있게 된다.

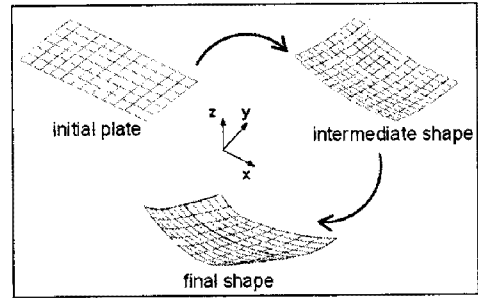


Fig. 2 Forming procedure

3. 중간 형상으로의 근사

성형 경로 설계를 위한 중간 형상 근사를 위해 본 연구에서는 최적 설계 문제를 정의하고 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 적용하였다. 설계 변수에 대한 목적 함수(objective function)와 구속 조건(constraint conditions) 등의 구체적인 내용은 다음 절에서 설명하기로 한다.

3.1 유전자 알고리즘을 이용한 중간 형상의 근사

3.1.1 설계 변수(design variables)

주어진 최종 형상에 가장 근사되는 중간 형상을 찾기 위해 근사 과정을 최적화 문제로 정식화하였다. 본 연구에서 정의되는 중간 형상은 식 (1)과 같이 종방향과 횡방향의 곡률 반경을 이용하여 양함수식(explicit function)으로 나타낼 수 있다.

$$z = \rho_T^* \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{y}{\rho_T^*} \right) \right) \right) + \rho_L^* \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{x}{\rho_L^*} \right) \right) \right) \quad (1)$$

여기서 x, y 그리고 z 는 3차원 공간에서 주어진 곡면 좌표를 나타내고 ρ_T^* 와 ρ_L^* 는 각각 중간 형상의 횡방향과 종방향의 곡률 반경을 나타낸다. 따라서 주어지는 문제는 최종 형상에 가장 근접하는 중간 형상의 ρ_T^* 와 ρ_L^* 를 결정하는 문제로 귀결되므로 최적화 문제에서의 설계 변수는 ρ_T^* 와 ρ_L^* 가 된다.

3.1.2 목적 함수(objective function)

Fig. 3는 최종 형상과 이에 근접하는 중간 형상을 나타낸다. 여기서 p_i 는 최종 형상 위의 임의의 점이며, p_i^* 는 구하고자 하는 중간 형상 위의 점으로 p_i 와 대응하게 된다. 최소제곱법(Least square)을 이용하여 두 대응점간의 z 방향 변위차

를 최소화시킨다면 최종 형상에 가장 근접하는 중간 형상을 찾을 수 있게 된다. 따라서 두 대응 점들 간 변위차의 제곱합을 최소화시키는 목적 함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

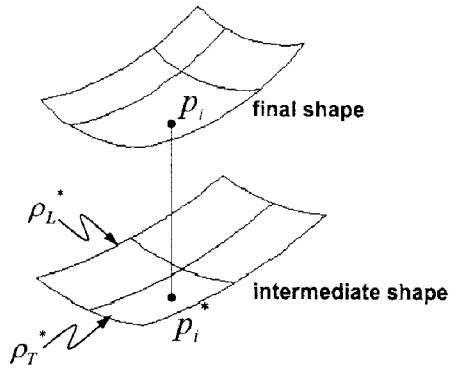


Fig. 3 Distance between final shape and intermediate shape

$$\text{minimize } F = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2(t) = \sum_{i=1}^m |p_i - p_i^*|^2 \quad (2)$$

여기서 m 은 변위차 계산을 위한 곡면 위 좌표의 개수를 나타낸다.

3.1.3 구속 조건(constraint conditions)

앞서 언급한 바와 같이, 중간 형상은 초기 평판에서 최종 형상 성형 이전에 가공되는 형상이므로 중간 형상이 가지는 곡률은 최종 형상의 곡률보다 작아야 한다. 따라서 식 (3)과 같은 구속 조건식을 가지게 된다.

$$\rho_L^* > \rho_{L,\max}, \rho_T^* > \rho_{T,\max} \quad (3)$$

여기서 $\rho_{L,\max}$ 와 $\rho_{T,\max}$ 는 각각 최종 형상의 종방향과 횡방향으로의 최대 곡률 반경값을 나타낸다.

3.1.4 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)

유전자 알고리즘은 최적화 및 탐색 문제에 정해(exact solution) 또는 근사해(approximate solution)을 찾기 위해 사용되는 진화 알고리즘(evolutionary algorithm)의 한 방법으로 적자 생존과 유전의 메카니즘을 바탕으로 하는 탐색 알고리즘이다. 다시 말해 주어진 환경에 잘 적응하는 유전자만을 선택(selection)하고 교배(crossover)하고 때에 따라서는 돌연변이(mutation)도 하며 다음 세대에 우수한

유전 형질이 전달(reproduction)되게 된다. 따라서 진화(evolution)가 거듭될수록 주어진 환경에 더 적합한 유전자들만이 남아있게 된다[4].

본 연구에서의 주어진 문제에 대한 가능한 해는 주어진 구속 조건을 만족하는 중간 형상의 종방향 및 횡방향으로의 곡률값이 되며 이는 이진코딩(binary coding)에 의해서 표현된다. 또한 주어진 목적 함수(objective function)는 앞서 정의된 비용 함수(cost function), F 의 최소값을 구하는 문제이므로 이를 적합도 함수의 형태로의 변환이 필요하게 된다. 주어진 최소화 문제를 최대화 문제로 바꾸기 위해 식 (2)에서 정의된 비용 함수, F 를 식 (4)와 같이 이익함수(profit function)로 변환시켜 함수값 G 를 우수한 유전자 탐색을 위한 적합도 평가에 사용하기로 한다.

$$G = C_{\max} - F \quad \text{when } F < C_{\max} \\ = 0 \quad \text{otherwise} \quad (4)$$

여기서 입력계수로 주어지는 C_{\max} 는 함수 F 에 비해 충분히 큰 값으로 본 연구의 계산에서는 테스트 계산을 통해 경험적으로 설정하였으며 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 문제에 사용된 각 변수에 대해서는 여러 번의 시행 착오를 거쳐 Table 1에 나타낸 값일 경우 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였으며, 이 값들을 알고리즘 적용 단계에서 이용하였다.

Table 1. Parameters in GA

Parameters	Value
Crossover rate	0.8 (one point crossover)
Mutation rate	0.01
Number of population	100
Max. number of generations	1000
Selection	roulette wheel selection

3.2 알고리즘의 적용

3.2.1 알고리즘 검증용 위한 예제

유전자 알고리즘을 적용한 제안된 근사 방법을 몇 가지 예제 형상에 적용하여 그 가능성을 검증하였다. Fig. 4에 알고리즘 검증을 위해 선정된 최종 형상을 나타내었으며 그림에서와 같이 두 개의 오목형상(Fig. 4(a)와 (b))과 하나의 안장형상(Fig.

4(c)을 선정하였다. 주어진 최종 형상은 앞서 정의된 중간 형상으로 분류될 수 있는 형상으로서 종방향과 횡방향으로 일정한 곡률값을 가지는 형상임을 알 수 있다. 따라서 이러한 예제 형상에 제안된 근사 알고리즘을 적용한다면, 주어진 최종 형상에 근사되는 중간 형상은 동일한 곡률값을 가지는 동일한 형상이 되어야 할 것이다. 따라서 예상되는 결과값을 실제 계산 결과와 비교하여 제안된 알고리즘에 대한 성능을 확인하기로 한다.

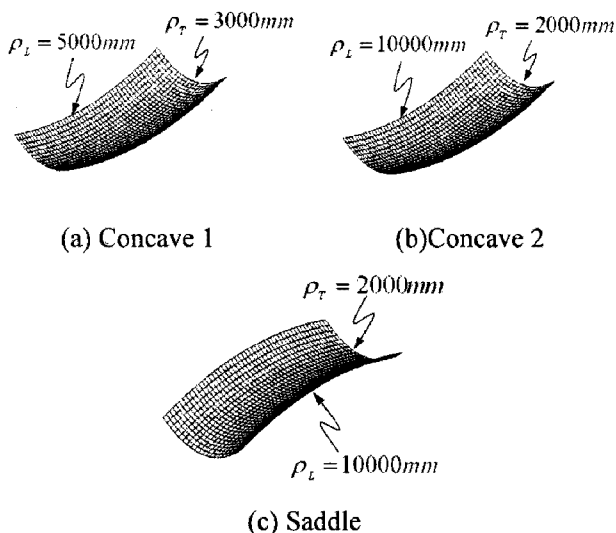


Fig. 4 Test shapes for the verification of the proposed algorithm

Table 2. Test results

		ρ_T / ρ_L
	Examples	Approximated shape
Concave 1	3000/5000	3005/5010
Concave 2	2000/10000	2015/10020
Saddle	2000/-10000	2003/-10016
average CPU time		15sec.
Computer spec.: Pentium 4, 2GB memory		

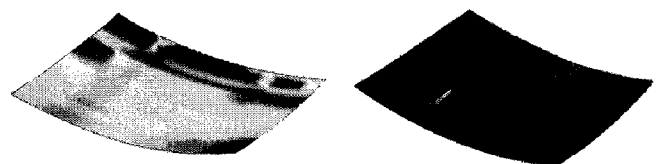
3.2.2 알고리즘 검증 결과

알고리즘 검증을 위한 테스트 결과를 Table 2에 나타내었다. 예제로 선정된 3가지의 최종 형상에 근사되는 중간 형상을 찾기 위해 최적화를 수행한 결과, 선정된 테스트 형상의 종, 횡방향의 곡률값과 동일한 값을 가지는 중간 형상의 곡률값을 찾을 수 있었으며 이는 주어진 최종 형상에 가장 근접하는 중간형상이 동일한 형상임을 의미

한다. 이는 앞서 예상된 결과값과 정확히 일치하며 이로써 유전자 알고리즘을 이용한 중간 곡면 최적해 탐색 방법의 타당성을 검증하였다.

3.2.3 실선체 곡면에의 적용

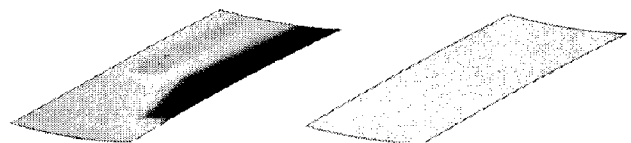
이전 장에서 테스트 예제를 이용해 검증된 알고리즘을 실선체 곡면에 적용함으로써 타당성을 검토하였다. 실제 조선 현장에서 건조되는 컨테이너선의 선체 중 일부의 곡면과 알고리즘 적용 결과를, 가우시안 곡률(Gaussian curvature) 분포를 이용하여 Fig. 5에 나타내었다. 가우시안 곡률 분포를 통해 알 수 있듯이, 주어진 실제 최종 곡면들은 복잡한 곡률 분포를 가진 형상임을 알 수 있다. 이에 대해 근사된 중간형상은 종, 횡방향으로 각각 일정한 곡률을 가지므로 가우시안 곡률 분포는 그림과 같이 곡면 전체에 걸쳐 균일한 값을 가짐을 알 수 있다. 이로써 복잡한 곡률 분포를 가지는 최종 형상에 근접하는, 균일한 곡률 분포를 가진 최적 중간 형상 근사를 위해 제안된 알고리즘에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 따라서 알고리즘 결과 도출되는 중간 형상으로 1차 가공을 거침으로서 최종 형상의 가공을 좀 더 용이하게 할 수 있을 것이다.



(a) Final shape 1 and its intermediate shape
($\rho_T^* = 5532mm$, $\rho_L^* = 4637mm$)



(b) Final shape 2 and its intermediate shape
($\rho_T^* = 3789mm$, $\rho_L^* = 6956mm$)



(c) Final shape 3 and its intermediate shape
($\rho_T^* = 2280mm$, $\rho_L^* = (-)37290mm$)

Fig. 5 Final shapes and corresponding intermediate shapes

이상에서 제안된 알고리즘의 적용에 있어서, 본 연구에서 정의한 중간 형상은 오목형 또는 안장형과 같은 단순 이중 곡면을 나타낸다. 따라서 실선체 곡면 중 일부 형상, 예를 들어 한 방향으로 양과 음의 곡률을 동시에 가진 형상이나 곡판의 일부에서는 곡률을 가지지 않는 평판 구간을 가진 형상들에 있어서는 그 사용이 제한된다. 하지만 선체의 많은 부분을 차지하는 대표적 이중 곡률을 가진 곡판에 있어서는 충분한 적용 범위를 가지고 있다고 할 수 있다.

4. 중간 형상 성형 실험

최종 형상에 근접하는 중간 형상을 위와 같은 방법을 이용하여 근사화시킨 후, 최종 형상 성형 단계 이전에 롤 셋을 이용하여 중간 성형 단계에 들어가게 된다. 중간 형상의 경우, 길이 방향과 폭방향으로의 곡률이 일정한 형상이므로 평판에서부터 점진적으로 원하는 중간 형상의 곡률을 가지도록 성형을 실시하게 된다. 이와 같은 방법으로 선급용 연강(Grade-A mildsteel AH32)을, 제안된 연구를 위해 개발된 롤 셋 실험 장치를 이용하여 성형 실험을 실시하였으며, 성형된 결과물들을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 성형된 결과물들은 판재 이송 중 롤 높이의 실시간 제어가 필요 없이 단계별 성형량을 결정하여 롤 높이 조절 후, 구동롤에 의해 판재를 이송시킴으로써 이중 곡면을 성형할 수 있게 된다. 따라서 그림과 같이 중간 형상의 성형이 완료되면 롤 셋에 의해 2차 가공이 되어 최종 형상으로 성형되는데, 현재 실시간 제어를 이용한 최종 목적 곡면의 성형을 위해 활발히 연구를 진행 중에 있다.

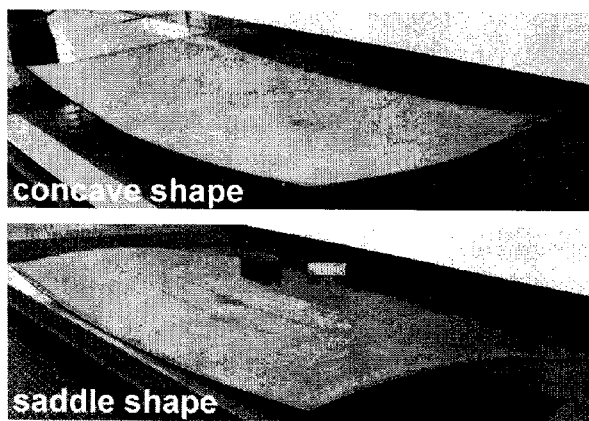


Fig. 6 Forming results (intermediate shapes).

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 선형 배열 롤 셋 공정이라는 냉간 가공 방법에 의해 선체 곡판과 같은 다양한 이중 곡률을 가지는 형상을 제작하기 위한 점진적 성형 공정 설계의 목적으로, 효과적 최종 형상 성형을 위한 중간 형상을 정의하였다. 주어진 최종 형상에 가장 근접하는 중간 형상을 탐색하는 방법을 유전자 알고리즘을 이용하여 제안하였으며, 실선체 곡면을 이용하여 알고리즘에 대한 타당성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 경상남도 지역산업 중점기술개발 사업인 “장방형 대형 후곡판용 점진적 롤 성형 시스템 개발”의 일부이며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 심도식, 양동열, 노형주, 김광희, 정성욱, 한명수, “선형 배열 롤 셋을 이용한 이중 곡판 제작을 위한 공정 설계에 관한 기초 연구,” 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 400~403, 2008.5
- [2] D. S. Shim, C.G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, J. M. Han, M. S. Han, 2007, “Process Development And Simulation For Cold Fabrication Of Doubly Curved Metal Plate By Using Line Array Roll Set,” Numiform2007, June 17-21, Portugal, pp. 865~870.
- [3] T. Nomoto, T. Ohmori, T. Sutoh, M. Enosawa, K. Aoyama, and M. Saitoh, 1991, “Development of Simulator for Plate by Line Heating,” J. Soc. Nav. Arch. Japan, Vol. 170, pp. 577~586.
- [4] David E. Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning,” Addison-Wesley, 1989