

# 다점 펀치를 이용한 조선용 곡판 냉간 성형 방법 연구

고영호<sup>#</sup>, 한명수<sup>1</sup>, 한종만<sup>1</sup>, 김광호<sup>2</sup>

## A Study on Cold Forming of Curved Thick Plate by Reconfigurable Multi-Punch Dies

Y. H. Ko, M. S. Han, J. M. Han, K. H. Kim

### Abstract

Curved thick plate forming in shipbuilding industry is currently performed by a thermal process, called as Line Heating by using gas flame torches. It was examined as an alternative way in this study to manufacture curved thick plates by the multi-punch die forming. Experiments and finite element analyses were conducted to evaluate the feasibility of the reconfigurable discrete die forming to the thick plates. Configuration of the multi-punch dies suitable for multi-curvature was investigated. As a result, single step forming by reconfigurable discrete die with scale factor improved formability.

**Key Words** : Multi Punch Forming, Curved Surface, Scale Factor, Finite Element Analysis

### 1. 서론

조선, 중공업 구조물의 외관은 일반적으로 두꺼운 금속 판재로 구성되며 이러한 구조 외판재는 구조 기능 및 사용 성능 향상 때로는 미관을 이유로 곡면부를 갖게 되는데 이러한 후판 곡면을 제작할 때 일반적으로 열간 가공법을 사용하고 있다. 일정한 곡률을 갖는 단순 곡면체를 성형할 때에는 프레스 성형 또는 롤 성형 등의 냉간 성형법을 적용하기도 하지만 복잡한 형상의 후곡판을 제작하는데 사용하기는 어렵다. 대신 조선소에서는 복잡한 형상의 후곡판을 제작하기 위해 선상 가열법(line heating)을 적용한다. 선상 가열법은 판의 국부가열과 수냉으로 발생한 판의 굽힘과 수축을 통해 곡면을 제작하는 일종의 열간 소성 가공법이다. 이와 같은 선상 가열법은 대부분 수작업으로 진행되기 때문에 생산성이 낮다. 또한

작업 중 발생하는 고열과 소음 심광 등에 열악한 작업환경에 작업자가 노출되어 있다. 기술적인 면에서는 수많은 작업 변수에 따라 성형 결과가 달라지기 때문에 경험이 풍부한 숙련자를 요하므로 기술 습득에 오랜 기간이 걸리고 기술자의 노령화로 기술 단절의 위험이 있다.

본 연구에서는 이러한 관점으로부터 상하로 구성된 다수의 금속 펀치(punch)로 다양한 곡면을 자유롭게 성형할 수 있는 다점 성형 (Multi Punch Forming) 기술을 제안하였다. 이 기술은 크고 다양한 형상을 가진 조선용 곡판의 특성에 맞게 가변형금형을 이용한 다이(die) 성형법으로 상하부의 펀치를 목적 곡면에 따라 사전 배열한 후 성형하는 것이다. 본 연구에서 다점 성형법의 조선 적용성 검토를 위해 오목곡(concave)에 대해 해석을 수행하고 국부적인 가중치(scale factor)로 최적 곡면 성형 방법을 도출하여 실험과 비교하였다.

1. 대우조선해양 산업기술연구소

2. ㈜스틸플라워 기술연구소

# 교신저자: 대우조선해양 산업기술연구소,

E-mail:yhko@dsme.co.kr

## 2. 다점 성형법의 해석적 접근

### 2.1 펀치 접촉점 계산

목적 형상으로 성형 하기 위해서 펀치의 위치 좌표가 먼저 결정되어야 하며 이는 펀치와 소재의 접촉점을 계산하여 도출한다. 상하부 펀치 좌표가 정확하지 않으면 곡판에 주름이나 압흔의 발생 가능성이 높다. 펀치의 위치좌표는 상하부 펀치의 중심 축과 목적 형상이 만나는 점이 항상 실제 접촉점과 동일하지는 않기 때문에 곡판의 두께를 고려하여 상하부 펀치에 대하여 계산하였다. 펀치의 각 노드에서 곡판에 수직 거리를 구하여 최소거리를 도출함으로써 개별 펀치의 높이를 산출하였다.

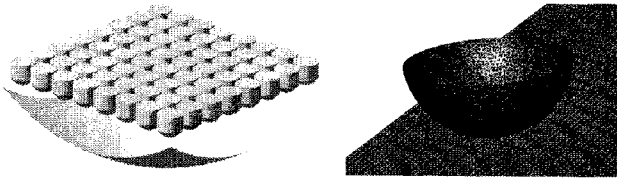


Fig. 1 Determination of upper punch location

### 2.2 유한요소모델 구성

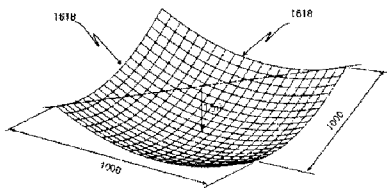
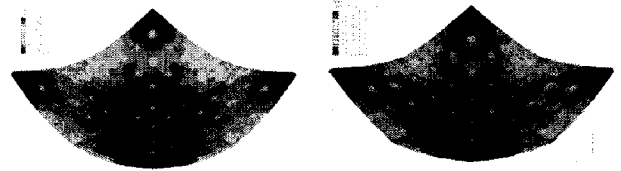


Fig. 2 Dimension of curved surface

Fig.2와 같이 초기 판재의 크기는  $1000 \times 1000 \times 20$ 로 목적 곡면의 중립축 곡률 반경이 1618mm이며 최종 곡 깊이는 158mm 정도이다.

$1m^2$ 의 판재를 성형하기 위해  $10 \times 10$ ,  $8 \times 8$  배열의 펀치를 고려하였다. Fig.3과 같이  $10 \times 10$  펀치 밀도를 가진 구조에서 성형 정밀도가 더 우수한 것으로 나타났으나 실제 장비 설계에서 설계치수에 대한 전반적인 검토가 필요하기 때문에 이를 병행하였다. Table.1은 안전 계수(safety factor)를 2로 가정하고 직경 40 키 홀 중공 축으로 가정하여 계산한 것이다. 결과를 토대로 각 펀치간의 간격과 펀치의 치수에 따라 구조적 강도를 함께 고려한 결과  $10 \times 10$  펀치 배열에서는 구성요소간의

조립시 공간이 부족할 뿐 아니라 나사산 가공부간의 간격이 좁아서 성형 실험 시 충분한 강성을 유지하기 힘들 것으로 판단되었다. 따라서  $8 \times 8$  배열의 펀치를 해석 모델로 결정하였다.



(a)  $10 \times 10$  punch array (b)  $8 \times 8$  punch array

Fig.3 Analysis results of curved surface

Table 1 Comparison of measured roughness data

	10×10	8×8
Max. bending stress	356 MPa	347 MPa
Compression stress	55 MPa	62 MPa
최소 외경	82mm	85mm

### 2.3 성형 해석

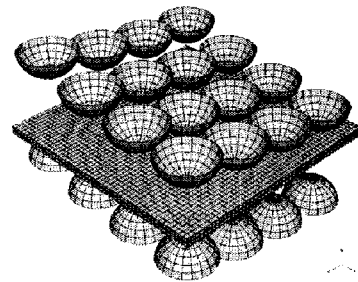


Fig.4 FE Model for the determination of the optimum punch position

본 연구에서 선택한 목적 곡면이 대칭 형상이기 때문에 Fig.4 와 같이 해석은 Abaqus 에서 1/4 모델로 수행하였다. 상부 펀치 배열은 곡률 반경 1608mm 인 곡면에 대해 계산하였으며 하부 펀치 배열은 판재 두께 20mm 를 고려하여 계산하였다. 사전 배열식 형태의  $8 \times 8$  배열의 펀치를 적용하였고 판재에는 자중과 quarter symmetric 경계 조건만 부여하였다.

Fig.5 는 목적 곡면의 곡률 반경에 따른 펀치 배열로 해석한 결과이며 Fig.6 에서 곡판 중심부의 상부면 곡률 반경을 비교하였다. 최외각 펀치가 접촉하는 유효 성형영역에서의 성형오차는 25mm 정도이며 미성형 부분을 포함한 가장자리(edge)

부근에서는 탄성 회복 이후에 최대 45mm의 성형 오차가 나타났다. 목적 곡면과 가공 곡면의 유사성을 비교하기 위하여 유한요소해석에서 계산된 절점들의 오차를 비교하여 식(1)과 같이 백분율로 표현하였다. N은 전체 비교 절점의 수이고 n은 목표 오차인 7mm 이내의 절점의 수이다. Fig. 6 (b)에 나타낸 것을 근거로 계산하면 51%의 유사성(similarity)이 나타났다.

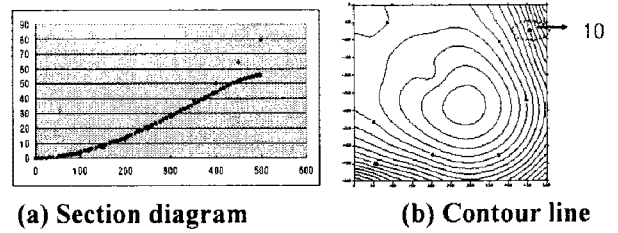


Fig.8 Shape deviation at unloading state(1229mm)

Fig.9는 증횡방향의 굽힘각을 19°에서 22°로 영역별 가중치를 다르게 적용하여 다중곡률에 의해 상하부 편치를 배열한 것이다. 이러한 편치 배열을 이용하여 해석한 결과를 Fig.10에 나타내었다. Fig.11과 같이 성형 오차가 크게 감소하였으며 전체 곡면 유사성은 81%까지 향상되었다. 그리고 유사성 계산에서 다점 편치에 의해 성형되지 않는 가장자리 부근을 제외한다면 곡면 유사성은 95%까지 증가한다

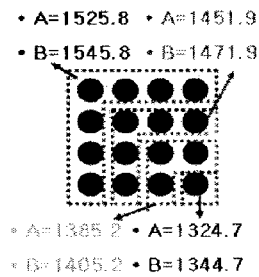
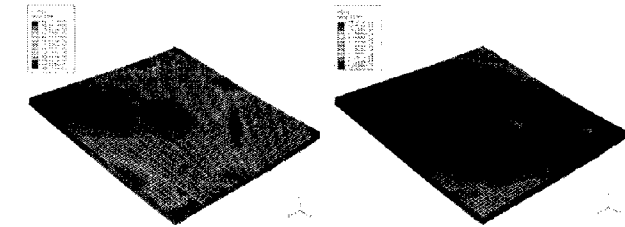
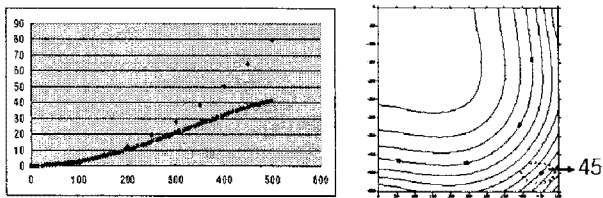


Fig.9 Punch array using multi-curvature



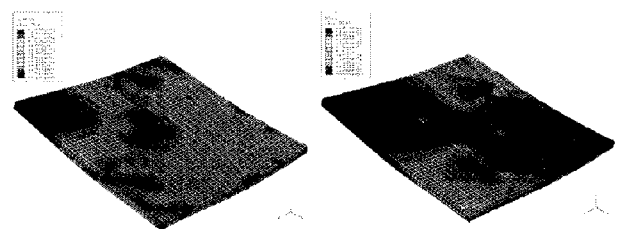
(a) Von-Mises stress (b) Equivalent plastic strain  
Fig.5 Analysis results of curved surface(1618mm)



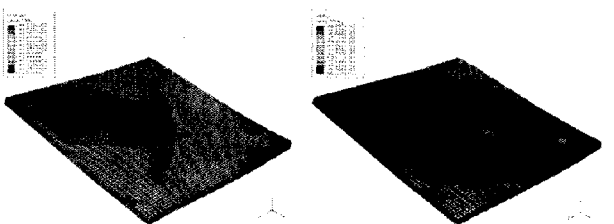
(a) Section diagram (b) Contour line  
Fig.6 Shape deviation at unloading state(1608mm)

$$\text{Similarity (\%)} = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

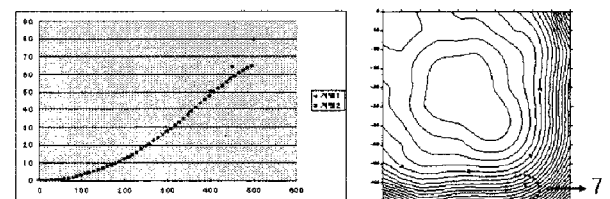
Fig.7은 성형 오차를 줄이기 위하여 증횡방향의 굽힘각을 18° (곡률반경 1618mm)에서 24° (곡률반경 1229mm)로 과성형한 결과이다. 유효 성형 영역에서의 오차는 10mm 정도이며 가장자리 부근에서는 대략 20mm로 곡판의 유사성 70%까지 향상되었다. 그러나 Fig.8에서와 같이 모든 행과 열 편치에 동일한 가중치(scale factor)의 곡률 반경을 적용하면 임의의 곡률 반경 이후에는 곡면에 과성형과 미성형 영역이 함께 나타난다.



(a) Von-Mises stress (b) Equivalent plastic strain  
Fig.10 Analysis results of curved surface



(a) Von-Mises stress (b) Equivalent plastic strain  
Fig.7 Analysis results of curved surface(1229mm)



(a) Section diagram (b) Contour line  
Fig.11 Shape deviation at unloading state

### 3. 성형 실험

해석 결과의 검증 및 다점 성형 장치의 후판 곡면 성형에 대한 가능성을 검토하기 위하여 Fig.12 와 같이 사전 배열식 다점 성형 장치를 제작하였다. 펀치모듈은 2000ton 교정기에 부착하였으며 1000×1000×20 의 판재를 대상으로 1 회 가압하여 성형 실험을 수행하고 Fig.13 과 같은 시제품을 획득하였다. 실험은 해석 결과와 유사하게 가장자리 부근에 주름(Wrinkle)이 발생하였으며 정밀도가 높은 연속적인 곡을 만들지는 못했다. 이것은 다점 성형 장치가 일반적인 금형과는 달리 펀치간 간격이 존재하고 개별펀치가 구동되는 것이 아니라 사전 배열된 후 상부 프레스만 하강하면서 성형하는 방법이기 때문이다. 그리고 굽힘(Bending)조건하에서 상하부 펀치가 수직방향으로 연속적인 구속력을 가하지 못하였다. Fig. 14 는 해석 곡면과 실험 곡면을 비교한 것이다. 곡면 가장자리 부근에서의 오차가 상대적으로 크게 나타났으며 전반적인 성형 오차는  $\pm 6\text{mm}$  정도였다.

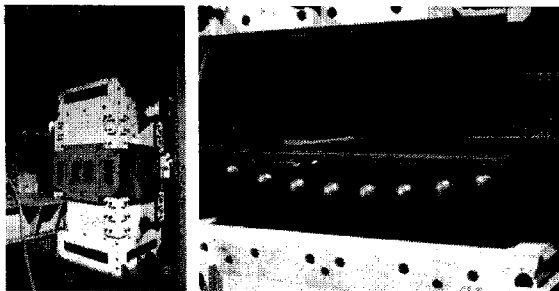
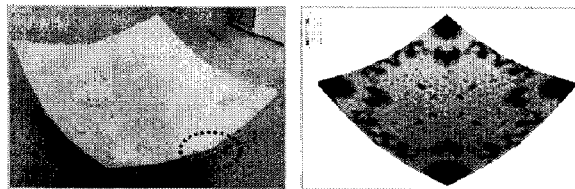


Fig.12 Multi-point forming machine



(a) Experiment

(b) Analysis

Fig.13 Deformed plate through MPF process



Fig.14 Comparison of deformed plate

### 4. 결론

본 연구에서 다점 성형법을 이용한 곡면 냉간 성형 기술의 후판 적용 가능성을 확인하고 성형 장치에 대한 Prototype을 제작하여 다점 성형 장치의 작동 상태 및 구조적 안정성을 입증하였다. 따라서 목적 곡면 성형을 위해 중형방향의 굽힘각에 가중치를 부여하여 다중 곡률 펀치 배열을 적용하게 되면 여러 성형 단계(multipass forming)를 거치지 않고도 목적 곡면과 유사한 곡면을 성형할 수 있을 것이다. 앞으로 다점 성형법을 이용하여 결함을 제어하고 정밀한 성형이 이루어진다면 후판 곡면 생산성 향상에 기여할 것이다.

### 후 기

본 연구는 경상남도 지역산업 중점기술개발 사업(70000526)인 “ 후판 3차원 이중곡면 냉간 성형 장치 개발” 의 일부이며 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.Z. Li, Z.Y. Cai, Z. Sui, Q.G. Yan, 2002, Multi-point forming technology for sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 333 ~338.
- [2] Zhong-Yi Cai, Ming-Zhe Li, 2004, Finite element simulation of multi-point sheet forming process based on implicit scheme, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 161, pp. 449~455
- [3] Sebastiaan H.A.Bores., Piet J.G.Schreurs., and Marc G.D.Geers., 2005, Path-dependent plasticity and 3D discrete forming, VIII International Conference on Computational Plasticity.
- [4] J.H. Lee, J.S. Yoon, C.H. Ryu, S.H. Kim, 2007, Springback compensation based on finite element for multi-point forming in shipbuilding, Advanced Materials Research, Vol. 26-28, pp. 981~984.