

대면적 후곡판 성형을 위한 블랭크 지지구조 설계

곽봉석¹ · 윤만중² · 전재영² · 강범수¹ · 구태원[#]

Design of Blank Support Structure for Large and Curved Thick Plate Forming

B. S. Kwak, M. J. Yoon, J. Y. Jeon, B. S. Kang, T. W. Ku

(Received November 1, 2017 / Revised December 15, 2017 / Accepted December 27, 2017)

Abstract

As one of the functional metal parts in steam turbine diaphragm assembly, the hollow-partitioned turbine nozzle (stator) has large and thick geometries, as well as an asymmetric configuration. Therefore it is hard to support a metal blank in the die cavity. To ease this situation and control posture and position of metal blank (workpiece), a blank support structure is newly introduced. The blank support structure is basically composed of enlarged arms from the blank, guide pins and linear bearings. It can help to control the intermediate blank without a critical sliding phenomenon. The operation mechanism of this blank support structure, during thick plate forming for the hollow-partitioned turbine nozzle stator, is first evaluated. A series of FEM-based numerical simulations, with respect to the width of the guide arm as geometric design parameters, are carried out to investigate its applicable range. As the results, it is observed the blank support structure for this thick plate forming can guide the workpiece to have stable posture during the plate forming process.

Key Words : Steam Turbine, Hollow-Partitioned Nozzle Stator, Thick Plate Forming, Blank Support Structure

1. 서론

화력이나 원자력 발전에서는 증기의 열에너지를 전기에너지로 효율적으로 전환하는 것이 중요하다. 그러나, 효율을 높일수록 증기 터빈(steam turbine)의 저압단(low pressure turbine)에서는 낮은 압력과 낮은 온도로 인하여 증기 포화도(saturation)가 감소하여 액적(water droplet)이 형성되고(Fig. 1 참조), 이는 이후의 동익(rotor)이나 정익(stator)에 충돌하여 심각한 침식현상(water droplet erosion)을 야기한다[1]. 이로 인하여 유동의 흐름이 원활하지 못하게 되고, 터빈 날개의 질량 분포가 변하게 된다. 이러한 회전 불균형에 의

해 진동이 발생하게 됨에 따른 터빈의 수명 저하를 개선하기 위한 다양한 방법이 제시되고 있다. 대표적으로 블레이드의 앞전(leading edge)에 침식 방지재(erosion shield)를 부착하는 방법, 고압 터빈에서 저압 터빈으로 이어지는 중간 유로에 원심력을 이용하여 물리적으로 습분을 분리하는 습분 분리기(moisture separator)를 설치하는 방법, 재가열 장치(reheater)를 통해 증기의 포화도를 다시 높이는 방법, 블레이드에 습분 흡입구(suction slot)를 만들어 습분을 빨아들여 밖으로 배출하는 방법 등이 있다[2]. 특히, 습분 흡입구를 사용하는 방법은 증기 유로에 추가적인 장비를 설치할 필요 없이 터빈 내부에서 물리적으로 습분을

1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 파워엔지니어

Corresponding Author : ERC/ITAF, Pusan National University, E-mail: longtw@pusan.ac.kr

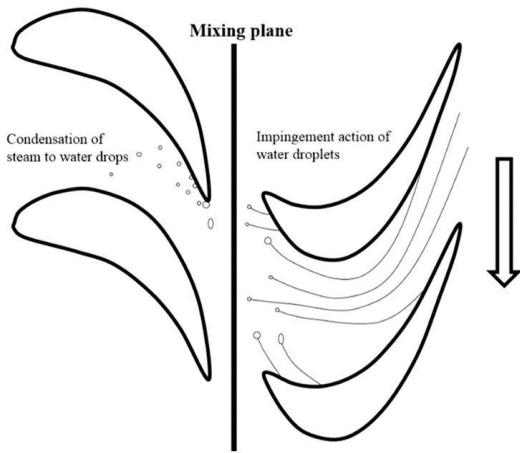


Fig. 1 Schematic view of water droplet erosion in lower pressure steam turbine[3]

제거한다는 장점이 있다.

증기 터빈의 블레이드는 정익과 동익으로 구성되어 있는데, 동익은 터빈축(turbine shaft)을 기준으로 고속 회전을 하게 되고, 이에 따라 큰 원심력이 걸리므로 높은 구조 강도가 필요하다. 또한 동익이 장착되어 있는 터빈축도 회전하고 있으므로 외부로 습분을 배출하기가 쉽지 않은 구조를 가지고 있다. 이와는 달리 정익은 유동이 가하는 압력만 버티면 되므로 큰 구조 강도가 필요하지 않고, 회전하지 않는 고정체인 다이어프램(diaphragm)에 부착되어 있으므로 습분을 외부로 배출하기 위한 유로를 구성하기도 쉽다. 따라서 습분 흡입구는 정익에만 적용된다.

정익 내부에는 습분을 배출하기 위한 통로가 필요한데, 가늘고 긴데다 직선이 아닌 구멍을 가공하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 중공형(hollow type)으로 제작하여 내부 공동을 유로로 사용하는 것이 훨씬 효율적이다. 중공 제품은 원재료에서 단일 공정으로 성형하거나 가공하는 것은 어려우므로 일반적으로 2개 혹은 3개로 분할된 곡판을 성형한 후에 용접 과정을 거쳐 제작하는 방법이 주로 적용되고 있다. 이러한 후판 성형공정(thick plate forming process)은 분할된 각 곡판이 가지는 3차원적 비대칭 형상으로 인해 성형과정에서 초기 블랭크를 안정적으로 지지하기가 어렵고, 이와 더불어 성형 과정에서도 불안정한 지지구조로 인해 한쪽으로 미끄러지는(sliding) 현상이 발생하게 된다. 일반적으로 판재성형공정에 활용되고 있는 블랭크 홀더(blank holder) 혹은 드로우-비드(draw-bead)를 적용할 수 있으나, 본 연구에서 다루는

후판 성형에서는 후판 블랭크를 사용하고 목적 형상이 비대칭 구조를 가짐으로 인해 상기의 블랭크 홀더 또는 드로우-비드를 적용하기에는 과도한 블랭크 홀더 하중 필요 및 기하학적 측면에서의 드로우-비드 적용 한계 등으로 인해 어려움이 존재한다[4].

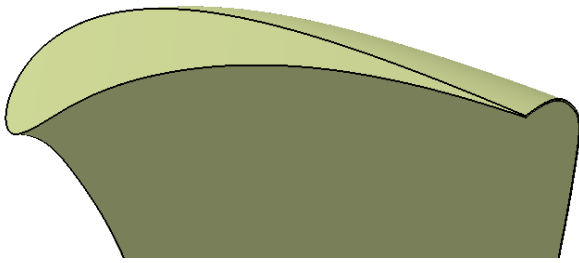
본 연구에서는 상부(upper) 및 하부(lower) 곡판으로 구성된 중공 분할형(hollow-partitioned) 증기 터빈용 노즐 블레이드(nozzle blade)에 있어서, 요구 두께가 5.00mm인 상부 곡판을 동일한 두께를 가지는 후판을 이용하여 성형할 경우, 블랭크를 안정적으로 지지할 수 있는 블랭크 지지구조(blank support structure)를 설계하였다. 본 연구에서의 블랭크 지지구조는 블랭크의 길이방향으로의 양쪽 끝단에 가이드 암(guide arm)을 적용하고, 외부에서 블랭크암과 연결되어 블랭크를 지지하는 가이드 핀(guide pin) 및 리니어 베어링(linear bearing), 그리고 가이드 핀을 고정하기 위한 가이드 블록(guide block) 등으로 구성된다. 본 연구를 통해 제안된 후곡판 성형용 블랭크 지지구조를 이용하여 중공 분할형 증기 터빈 노즐의 상부 곡판에 적용하여, 해석적 타당성을 검토하였다. 이를 통해, 본 연구에서 제안된 블랭크 지지구조는 대면적을 가지는 후곡판 성형 공정 적용에 적합함을 알 수 있었다.

2. 중공 분할형 노즐 정익

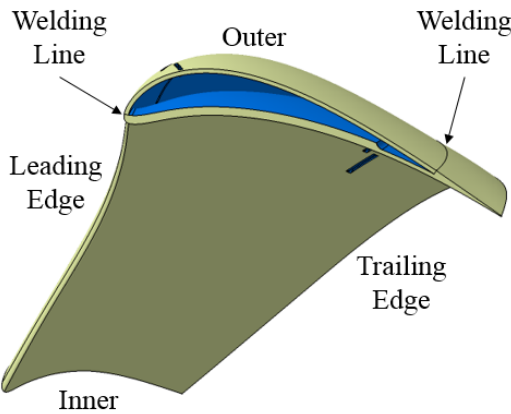
2.1 중공 분할형 노즐 정익의 형상

중공형 블레이드(hollowed blade)는 내부가 비어 있는 형상을 가지므로 Fig. 2(a)에서와 같은 기존의 일체형(solid) 블레이드에 비해 가볍고, 판재를 굽힘 성형하여 제작하므로 재료를 절삭 가공하는 것에 비해 생산이 빠르고 단가가 저렴하다는 장점을 가지고 있는 반면에 판재 성형에서 필연적으로 발생하는 탄성 회복(elastic recovery)에 의해 치수 정밀도가 낮아지는 단점이 존재한다. 그러나, 이는 금형의 정밀한 보정에 의해 보상이 가능한 부분이며, 따라서 대량 생산을 할수록 일체형 블레이드에 비하여 중공형 블레이드가 유리하다고 할 수 있다.

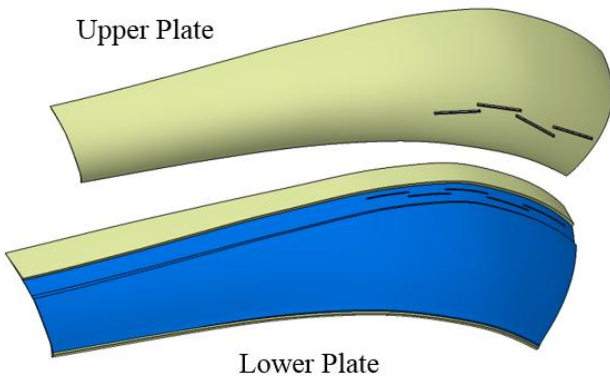
본 연구에서 다루는 중공형 노즐 정익은 2개의 대형 후곡판으로 분할되어 성형된 뒤 용접 공정을 통해 제작된다. 곡률이 가장 큰 앞전(leading edge) 부위와 곡률 상의 첨점(cusp)이 위치하는 뒷전(trailing edge) 부위에서 제품을 분할하여 상판(upper plate)과 하판(lower plate)으로 각각 분할하였다. 이에 따라 증



(a) 3D configuration of solid-type turbine blade



(b) 3D configuration of hollowed turbine blade



(c) Top view of partitioned upper and lower plates

Fig. 2 Classification of solid-type and hollowed turbine blades

기 터빈용 중공형 노즐 정익은 Fig. 2(b)와 같은 구조를 가지게 된다. 즉, 내부에 습분 배출 통로가 되는 공동(cavity)이 있고, 윗면 앞전 부근과 아랫면 뒷전 부근에 각각 습분을 빨아들이는 습분 흡입구(suction slot)가 위치해 있다. 가스 터빈에서 정익과 동익의 냉각을 위한 중공형 정익 혹은 동익에 대한 연구가 이루어진 바가 있으나, 이는 내부의 유체와

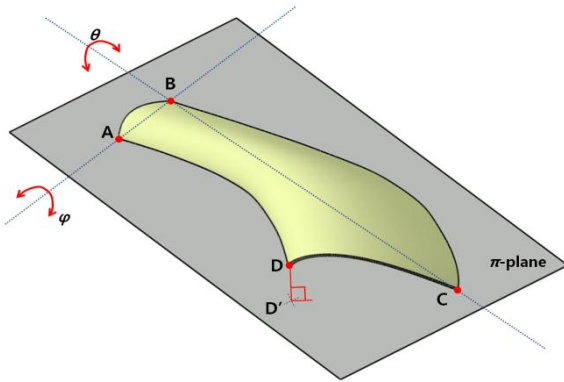
정익이 맞닿는 표면적을 늘리기 위한 것으로 내부 형상에는 상당한 차이가 있다[5]

상판은 5.00mm의 두께를 가지며 하판에 비해 굽혀진 정도가 심하며 곡률이 더 크다는 것을 알 수 있다. 하판의 경우 10.00mm의 두께를 가지며 상판에 비해 곡률은 작으나 뒷전 부위에 홈(groove)이 있기 때문에 추가적인 가공이 필요하다. 하판은 해당 홈을 추가적으로 가공해야 하는 차이만 있을 뿐, 굽힘의 정도가 상대적으로 적고, 두꺼운 두께로 인하여 탄성 회복이 상판에 비해 상대적으로 적게 발생할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 성형 난이도가 더 높을 것으로 예상되는 상판에 대한 후판 성형 공정을 다루었다. 이와 더불어 각각 성형된 상판과 하판은 앞전과 뒷전 부에서 용접 공정을 통해 Fig. 2(c)에서와 같이 결합되고, 특히 하판의 홈에 상판의 뒷전이 맞대어져 결합된다.

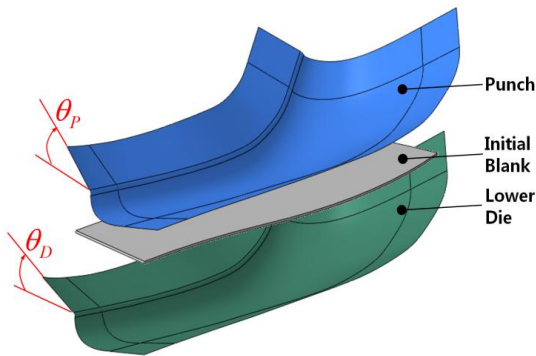
2.2 후판 성형을 위한 블랭크 지지 구조

본 연구와 관련된 선행 연구에서는 페라이트계 스테인레스강(ferritic stainless steel)인 두께 약 5.00mm의 SUH409L에 대한 대곡면 후판 성형을 위한 금형설계 방안을 소개한 바 있다[3]. 특히, 금형 내부에 장입된 후판 블랭크를 지지하기 위한 블랭크 홀더 또는 드로우 비드 등의 블랭크 지지구조가 적용되기 어려운 상황을 고려하고, 비대칭적 목적 형상에 따른 언더-컷(under-cut) 현상 발생을 억제하기 위해 상부 및 하부 금형에서의 적절한 금형면 위치를 설정하고자 기준 평면(π -plane) 개념을 도입한 바 있다. 이와 더불어, 상부 및 하부 금형의 외측 플랜지부 어깨각(shoulder angle)을 공정 변수로 설정하여, 후판 블랭크가 금형 내부에서 적절한 변형 이력을 가지는지 혹은 미끄러짐 현상이 발생하는지, 그리고 성형 불량 발생 하는지 등에 대한 인자적(parametric) 연구를 수행한 바 있다(Fig. 3 참조). 이러한 선행 연구를 통해 도출된 금형 설계 결과를 바탕으로 실험적 연구를 수행한 결과, 대면적의 복잡한 곡률 분포를 가지는 상판의 경우 최종적인 목적 형상으로 후판 성형은 가능하지만, 후판 성형중에 금형 내부에서 블랭크 미끄러짐에 의한 성형 형상의 치우침 문제와 일정한 형상 구현 등에는 다소 한계가 존재한다는 것이 예측되기도 하였다.

본 연구에서는 이전 연구에서 도출된 금형설계 결과를 바탕으로, 앞서 언급한 문제들을 개선 및 해결



(a) Concept of π -plane for positioning tool surface

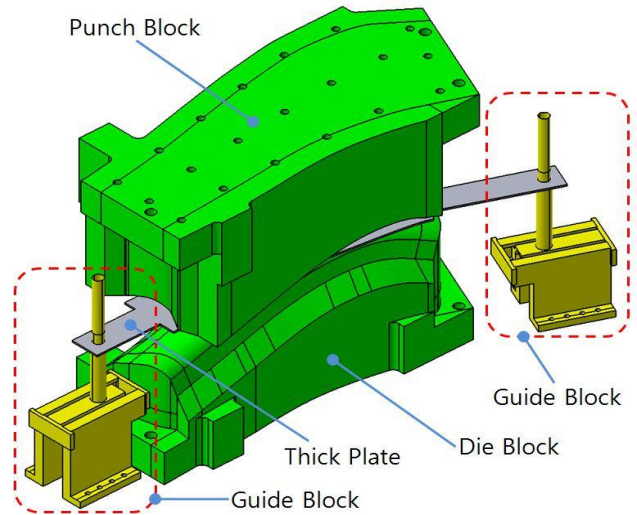


(b) Shoulder angles of forming punch and lower die

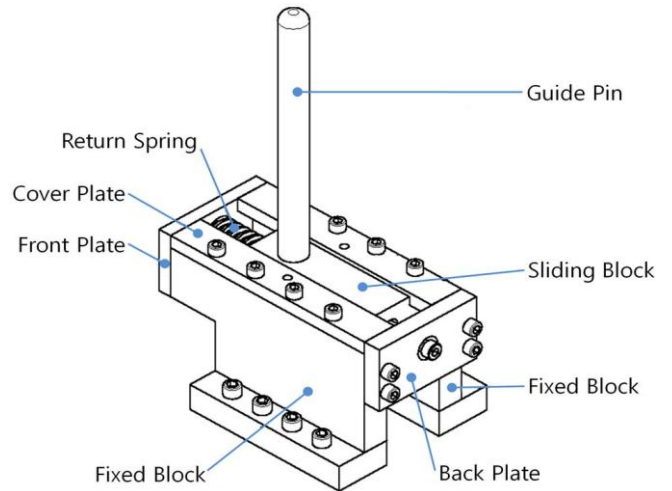
Fig. 3 Geometric approach example for tool design of thick plate forming [3]

하기 위해 금형 내부에 장입되는 후판 블랭크를 적절한 위치로 안내함과 동시에 성형 과정에서의 미끄러짐을 방지할 수 있는 블랭크 지지구조를 고안하였다. 즉, Fig. 4(a)에서 제시된 중공 분할형 증기 터빈용 노즐 블레이드의 후판 성형을 위해 기존에 설계·개발된 대곡면 후판 성형을 위한 금형 블록 이외에 Fig. 4(b)와 같이 길이 방향의 양 끝단의 금형 외부에 설치되는 블랭크 가이드 블록(guide block)과 가이드 암과 가이드 홀을 가지는 개선된 형태의 블랭크(Fig. 4(c) 참조)로 구성된 블랭크 지지구조를 제안하였다.

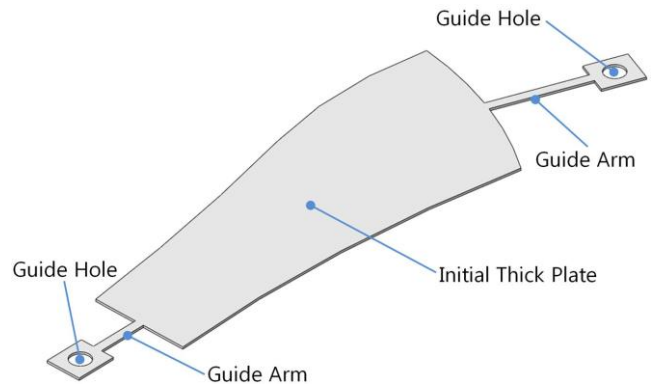
Fig. 4(b)에서의 가이드 블록에는 블랭크의 가이드 홀에 삽입되어 미끄러짐을 방지함과 동시에 상·하 이송을 원활히 하기 위한 가이드 핀(guide pin), 블랭크의 길이 방향으로의 변형을 적절하게 유도하기 위한 슬라이딩 블록(sliding block) 및 기타 부품들로 이루어져 있음을 알 수 있다. 슬라이딩 블록 내부에는 약 200N/mm의 강성(k)를 가지는 코일형 스프링(return spring)을 적용하여 가이드 핀을 적절히 지지하도록



(a) Blank support structure for thick plate forming



(b) Detail view of guide block in blank support structure



(c) Initial thick plate with guide arm and guide hole

Fig. 4 Schematic view of thick plate forming tool with blank support structure [6, 7]

하였다. 또한, Fig. 4(c)에서 제시된 후판 초기 블랭크는 길이 방향 양 끝단에 가이드 홀이 적용된 가이드 암이 기본적으로 적용되었다. 본 연구에서는 Fig. 4(b) 및 Fig. 4(c)에서와 같은 새로이 고안된 대형의 후판 블랭크 지지구조가 중공 분할형 터빈 노즐 정익의 상판에 대한 후판 성형공정에 있어서 금형 내부에서의 블랭크 위치를 적절히 제어함과 동시에 일정한 형태의 후판 성형품이 구현될 수 있는지를 검증하기 위한 해석적 연구를 병행하였다.

3. SUH409L 후판의 기계적 특성

증기 터빈용 중공 분할형 터빈 노즐 정익의 후판 성형공정에 사용된 소재는 페라이트계 스테인레스강 (ferritic stainless steel)인 초기 두께 5.00mm의 SUH409L 소재이며, Table 1에 화학적 성분을 요약하여 나타내었다. 또한, 본 연구에 사용된 SUH409L 후판재의 기계적 물성과 이방성 특성을 평가하기 위해 단축 인장 시험 표준 규격인 ASTM E8/E8M과 소성 변형률비 (plastic strain ratio) 시험 표준 규격인 ASTM E517-00을 참조하여 판재의 압연 방향(rolling direction)을 기준으로 0°, 45°, 90°의 각 방향별 시험 시편을 제작하였으며, 각각의 재료 시험을 실시하였다. 단축 인장 시험과 소성 변형률비 측정 시험을 통해 얻어진 기계적 물성치들은 Table 2에 요약하였다. 페라이트계 스테인리스강인 초기 두께가 5.00mm인 SUH409L 후판재는 약 247.59MPa의 항복강도(yield strength)와 약 572.11MPa 수준의 파단강도(ultimate strength), 그리고 약 1.0598의 평균 소성 변형률비를 가짐을 단축인장 시험과 이방성 시험을 통해 알 수 있었다. 이와 더불어, SUH409L 후판재에 대한 단축 인장시험을 통해 얻어진 진응력(true stress)-진변형률(true strain) 선도를 Fig. 5에 나타내었다.

일반적으로 후판을 이용하는 금속 성형공정에 있어서 소재의 이방성 거동을 고려하지 않는 경우가 많으나, 본 연구에서의 중공 분할형 증기 터빈 노즐은 길이 방향으로 약 933.00mm, 외측부 너비 약 348.00mm, 중간 너비 약 255.00mm 그리고 내측부 너비 약 167.00mm의 대면적(약 2,340cm²)이기 때문에 후판 성형과정에서 이방성이 발현될 가능성이 높은 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 SUH409L 후판재의 소성 이방성 거동을 고려하기 위해 Hill이 제안한 항복함수(Hill's 1948 yield function)에 근거한

Table 1 Chemical composition of SUH409L (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
0.005	0.500	0.240	0.023	0.002	11.20	0.190

Table 2 Mechanical Properties of SUH409L

Properties		Value
Initial Thickness (mm)		5.00
Young's Modulus (GPa)		200.00
Yield Strength (MPa)		247.59
Ultimate Strength (MPa)		572.11
Poisson's Ratio		0.30
Flow Stress	K (MPa)	687.50
Curve	n	0.26
Lankford's Value	r_0	0.5770
	r_{45}	1.0375
	r_{90}	1.5870
Normal Anisotropy	r_m	1.0598
Planar Anisotropy	Δr	0.0445

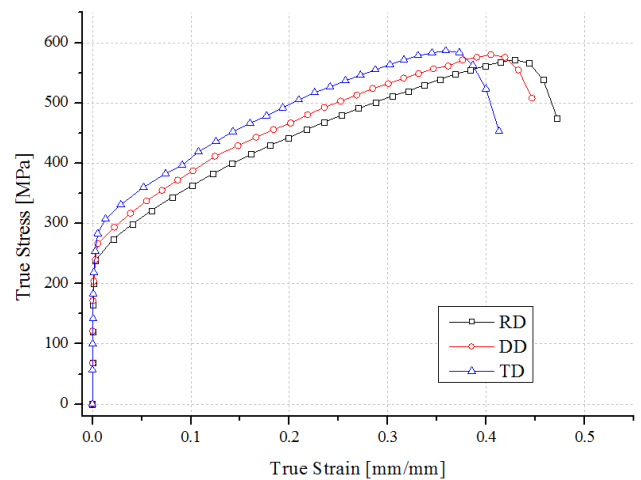


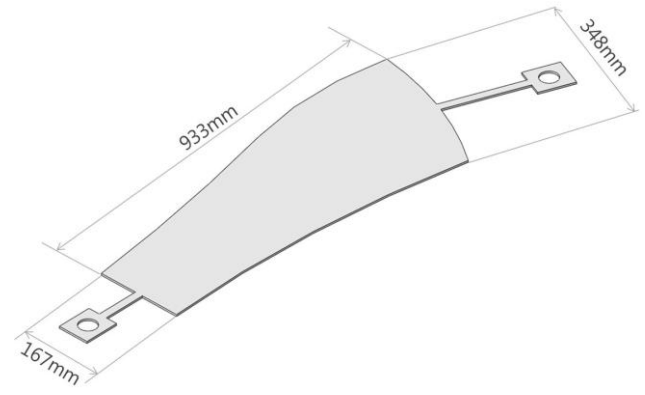
Fig. 5 True Stress-strain curves of SUH409L thick plate with thickness of 5.00mm

항복응력비(yield stress ratio, R_{ij})를 이용하였다. 즉, 식 (1)과 같은 Hill의 항복함수에서 6개의 이방성 매개변수(F, G, H, L, M, N)들은 식 (2)에서와 같은 항복응력비 관계식과 재료의 소성 이방성 계수(Lankford's value)를 활용하여 구할 수 있다. Table 2에 제시된 소성 변형률비(plastic strain ratio) 측정 실험 결과들을 통해 얻어진 SUH409L 후판재의 항복응력비와 소성 이방성 계수를 Table 3에 요약하여 나타내었다[8, 9].

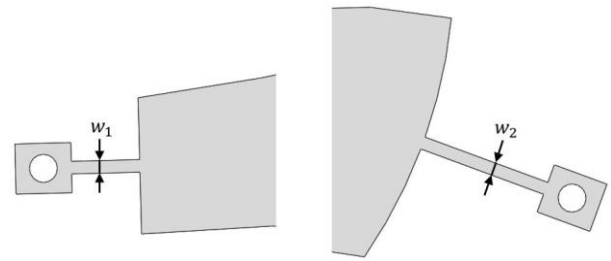
$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{0,22}^2} + \frac{1}{\sigma_{0,33}^2} - \frac{1}{\sigma_{0,11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\ G &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{0,33}^2} + \frac{1}{\sigma_{0,11}^2} - \frac{1}{\sigma_{0,22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \\ H &= \frac{\sigma_0^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{0,11}^2} + \frac{1}{\sigma_{0,22}^2} - \frac{1}{\sigma_{0,33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \\ L &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{0,23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \\ M &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{0,13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \\ N &= \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{0,12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= \frac{\sigma_{0,11}}{\sigma_0} = 1 \\ R_{22} &= \frac{\sigma_{0,22}}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \\ R_{33} &= \frac{\sigma_{0,33}}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} \\ R_{12} &= \frac{\tau_{0,12}}{\tau_0} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \\ R_{13} &= \frac{\tau_{0,13}}{\tau_0} = 1 \\ R_{23} &= \frac{\tau_{0,23}}{\tau_0} = 1 \end{aligned} \right\} (3)$$



(a) Initial blank shape with guide arms



(b) Detail view of guide arms and geometric parameters
Fig. 6 Initial blank design and geometric parameters of blank guide arm

Table 3 Yield stress ratios and anisotropic properties of SUH409L specimen

R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
1.0000	1.1607	1.1750	1.0564	1.0000	1.0000
F	G	H	L	M	N
0.2333	0.4910	0.5090	1.5000	1.5000	1.3440

4. 유한요소 모델링 및 형상 변수

4.1 초기 블랭크 설계

본 연구에서는 증기 터빈용 중공형 노즐 정익의 분할폼에 대한 대면적 후판 성형과정에 있어서, 3차원적 비대칭 형상에 기인하는 블랭크의 자세 불안

정성과 미끄러짐 현상을 방지하기 위한 방안으로 초기 블랭크의 길이 방향 양 끝단에 가이드 홀을 가지는 가이드 암(Fig. 4(c))과 이를 외부에서 지지하기 위한 가이드 핀이 고정된 가이드 블록(Fig. 4(b))을 제안하였다. 이러한 블랭크 지지구조가 후판 성형 과정에서 적절히 후판 블랭크를 지지함과 동시에 원활한 성형 과정을 유도할 수 있는지를 확인하기 위해 ABAQUS Explicit를 이용한 유한요소 해석을 수행하였다.

유한요소 해석에 적용된 초기 블랭크는 기존 선행연구에서 제시된 형상과 치수가 동일하지만[3], 길이 방향 양 끝단의 가이드 암을 추가적으로 적용하였다. 이에 따른 초기 블랭크 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소 모델링에 있어서, 초기 블랭크의 두께가 약 5.00mm의 후판임을 고려하여 두께 방향으로 4개의 층(4-layers, 1.25mm per layer)을 적용하였으며, 약 270,000개의 8절점 육면체 요소(8-node brick element)로 구성하였다. 그리고, 상부 성형 펀치 및 하부 다이, 가이드 핀 등은 강체 셸(shell) 요소를 사용하였다.

4.2 초기 블랭크의 형상 변수

초기 블랭크에 적용된 가이드 암으로 인해 후판 성형과정에 있어서 블랭크의 변형 거동은 다소 제한을 받게 된다. 그러나, 이러한 제한 거동으로 인해 블랭크의 위치를 적절히 조절할 수 있는 것 또한 사실이다. 이에 본 연구에서는 가이드 암이 적용된 초기 블랭크를 이용한 후판 성형공정 해석을 통해, 가이드 암의 폭의 크기에 따라 블랭크가 어떤 변형 거동을 가지는 지를 확인하고자 하였다. 즉, 초기 블랭크의 길이 방향으로의 양쪽 끝단에 적용된 가이드 암의 폭(w_1 , w_2)를 형상 변수로 설정하고, 이 폭의 크기에 따른 후판 성형에서의 변형 거동을 해석적으로 검토하였다. 단, 본 연구에서는 가이드 암의 적용에 따른 블랭크 지지구조의 유효성을 검

토하기 위해 초기 블랭크의 길이 방향 양 끝단부 중앙에 가이드 암이 위치하는 것으로 설정하였다. 가정된 형상 변수로써의 가이드 암의 폭은 20.0mm, 45.0mm 및 90.0mm 등 총 3가지 경우이며(Table 4 참조), 이를 후판 성형공정 유한요소 해석에 적용하였다.

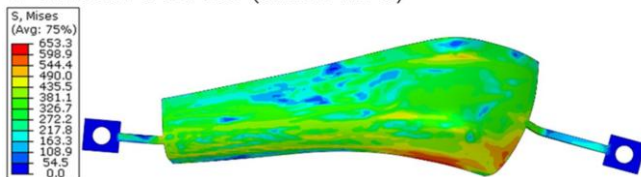
5. 유한요소 해석 결과

초기 블랭크에 가이드 암이 적용됨에 따른 후판 성형공정에서의 변형 거동 적절성을 확인하기 위한 유한요소 해석을 앞서 Fig. 4에서 언급된 금형 구조와 Table 2 및 Table 3에 요약된 재료 물성 그리고 Fig. 5에 제시된 유효응력-유효변형률 선도를 이용하여 수행하였으며, Table 4에 제시된 가이드 암의 폭 형상에 따른 영향을 검토하였다. Fig. 7에서는 후판 성형이 완료된 시점(즉, 상부 펀치의 스트로크가 100%에 도달하였을 때)에서의 유효응력과 유효변형률을 각각의 경우에 대해서 나타낸 것이다. 가이드 암의 폭 변화에 따른 유효응력 및 유효변형률 분포

Table 4 Geometric parameters for width of guide arm

	w_1	w_2
Case I	20.0mm	20.0mm
Case II	45.0mm	45.0mm
Case III	90.0mm	90.0mm

▼ Effective Stress (unit : MPa)

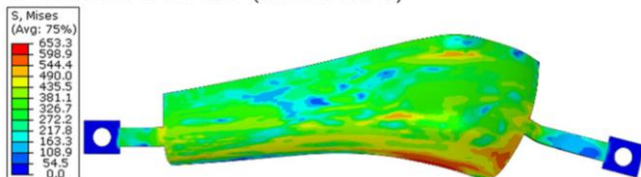


▼ Effective Strain



(a) Effective stress and strain distributions : $w_1=20.0\text{mm}$, $w_2=20.0\text{mm}$

▼ Effective Stress (unit : MPa)

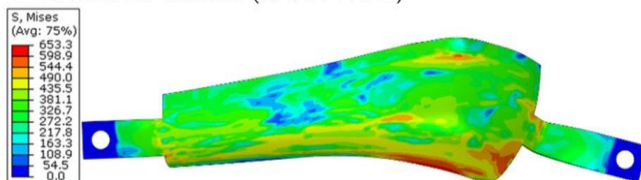


▼ Effective Strain



(b) Effective stress and strain distributions : $w_1=45.0\text{mm}$, $w_2=45.0\text{mm}$

▼ Effective Stress (unit : MPa)



▼ Effective Strain



(c) Effective stress and strain distributions : $w_1=90.0\text{mm}$, $w_2=90.0\text{mm}$

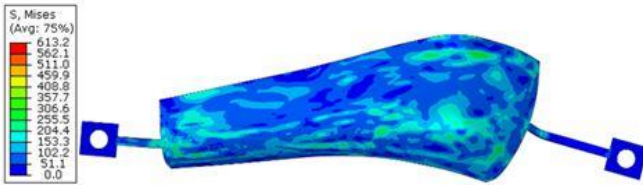
Fig. 7 Effective stress and strain distributions obtained from numerical simulations (before elastic recovery)

측면에서의 결과들은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있으나, 우측 가이드 암과 블랭크가 만나는 부위에서 폭이 90.0mm인 경우에 국부적으로 응력과 변형률이 집중됨이 관찰되었고, 해당 부위에서 블랭크의 가이드 암이 과도하게 굽혀지는 것을 확인할 수 있었다.

탄성회복에 의한 후판 성형품의 유효응력 분포를 Fig. 8에 도시하였다. 탄성회복에 따른 유효응력 분포는 가이드 암의 폭에 큰 영향을 받지 않는 것으로 조사되었으나, 탄성회복 후의 최대 유효응력 (maximum effective stress)에는 다소 차이가 남을 알 수 있었다. 즉, 가이드 암의 폭이 20.0mm로 좁을 경우에 최대 유효응력이 약 470MPa 수준으로 조사되었으나, 폭이 45.0mm 및 90.0mm인 경우에는 약 570MPa 수준의 최대 유효응력이 국부적으로 존재함을 해석 결과 분석을 통해 알 수 있었다.

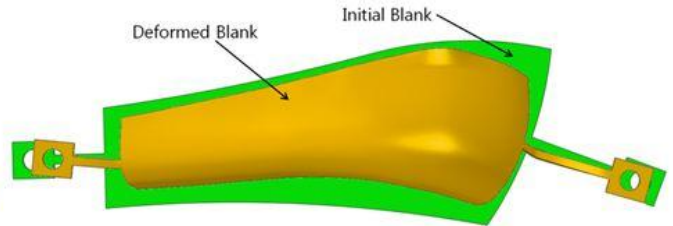
Fig. 8의 우측에는 블랭크 지지구조인 가이드 암이 적용된 초기 블랭크와 이를 적용하여 후판 성형공정이 수행된 후의 변형된 블랭크 형상을 평면상의 중첩된 이미지로 비교한 것이다. 비교 형상을 살펴보면, 후판 블랭크를 지지하기 위해 적용된 가이드 암은 금형 내부에서 과도하게 미끄러지는 현상을 적절히 완화시켜 준다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 금형 외부에 설치되는 가이드 블록 내부의 스프링(Fig. 4(b) 참조) 작동에 의해 가이드 암에 의해 발생할 수 있는 블랭크의 추가적인 인장 변형을 방지할 수 있도록 금형쪽으로 유연하게 이동함을 확인할 수 있었다. 또한, 성형 과정에서 금형면의 돌출부를 따라 블랭크가 안착되고 난 후, 블랭크의 가이드 홈(내부에 볼 부시가 적용됨)에 삽입된 가이드 핀에 의해 금형면을 따라 소재가 자연스럽게 변형되도록 약간의 회전을 허용함을 확인하였다.

▼ Effective Stress (unit : MPa)

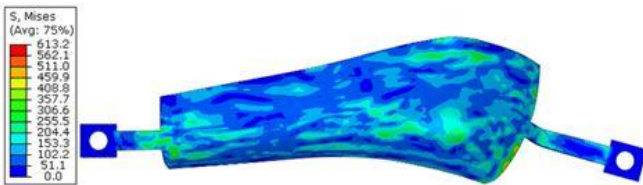


(a) Effective stress and deformed configuration after elastic recovery : $w_1=20.0\text{mm}$, $w_2=20.0\text{mm}$

▼ Initial blank vs. Deformed Blank

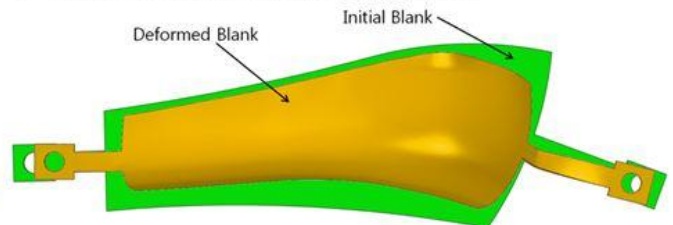


▼ Effective Stress (unit : MPa)

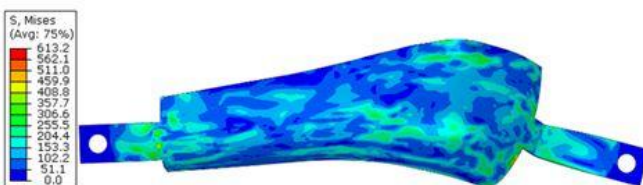


(b) Effective stress and deformed configuration after elastic recovery : $w_1=45.0\text{mm}$, $w_2=45.0\text{mm}$

▼ Initial blank vs. Deformed Blank



▼ Effective Stress (unit : MPa)



(c) Effective stress and deformed configuration after elastic recovery : $w_1=90.0\text{mm}$, $w_2=90.0\text{mm}$

▼ Initial blank vs. Deformed Blank

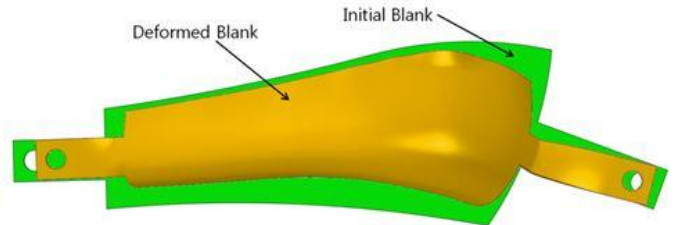


Fig. 8 Effective stress distribution and comparison between initial and deformed blanks after elastic recovery

6. 결론

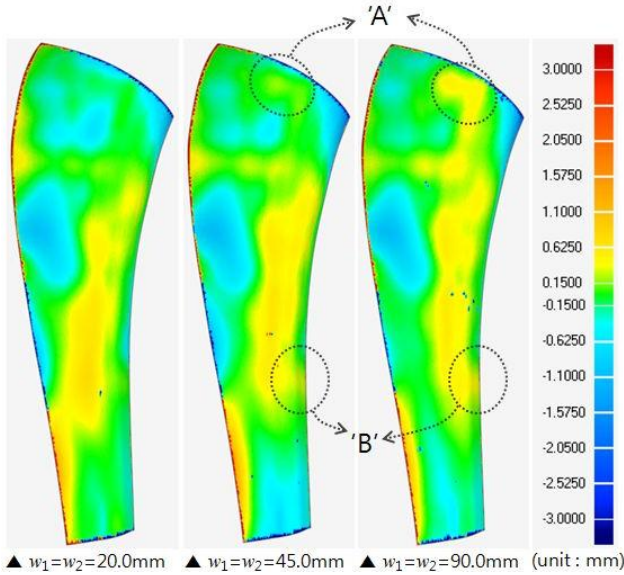


Fig. 9 Dimensional error distributions between required target shape and deformed geometry

또한, 본 연구에서의 후판 블랭크의 금형내에서의 안정적 지지를 위해 제안한 가이드 암과 가이드 핀이 설치된 가이드 블록 등을 적용한 증기 터빈용 증공형 노즐 정익의 상판(초기 두께 5.00mm) 후판 성형공정 유한요소 해석을 통해 얻어진 최종 변형 형상을 목적 형상과 비교하여, Fig. 9에 나타내었다. 전반적으로 블랭크 암의 폭 변화에 의한 치수 오차는 유효한 수준내에서 분포함을 알 수 있었다. 그러나, 가이드 암의 폭이 45.0mm와 90.0mm인 경우에 있어서, Fig. 9에 나타난 바와 같이 상단부에 연결되어 있는 가이드 암의 폭이 증가할수록 "A" 부위에서 국부적인 치수 오차 증가를 유발할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 하단부에 연결되는 반대 방향의 가이드 암은 폭이 증가할수록 Fig. 8에 나타난 바와 같이 자연스러운 회전보다는 금형 방향으로의 이송이 주로 발생함에 따라 "B" 부위에서 국부적으로 형상 오차가 증가할 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 가이드 암의 폭이 커짐에 따라 후판 블랭크가 금형면을 따라 성형되는 것을 일정부분 방해한다는 것을 의미한다. 이와는 별도로, 본 연구에서의 상부 곡판(Fig. 2(c) 참조)에 대한 블랭크 지지구조가 적용된 초기 블랭크를 이용하여 성형된 후 곡판의 최외각 부위에 나타나는 과도한 치수 오차는 향후 하부 곡판과의 용접을 위해 가공(trimming)될 것이기 때문에 논의로 하였다.

본 연구에서는 화력 및 원자력 발전소 등의 증기 터빈에서 생성되는 습분 액적(water droplet)을 제거하기 위한 방안으로 개발된 대면적의 증공 분할형 노즐 정익을 분할 곡판으로 성형하기 위한 후판 성형 공정을 소개하였다. 특히, 후판 블랭크 및 금형의 비대칭성과 금형 형상의 복잡성 등으로 인해 후판 블랭크가 금형내에서 과도한 미끄러짐 및 성형 불량 등을 방지하고, 후판 블랭크를 안정적으로 지지함과 동시에 적절한 성형 과정을 유도하기 위한 목적으로 후판 블랭크 지지구조를 제안하였다. 또한, 제안된 후판 블랭크 지지구조가 적용된 초기 후판 블랭크를 이용하여 대곡면 후곡판 유한요소 해석을 수행하였으며, 본 연구에서의 후판 블랭크 지지구조가 유연하게 블랭크를 지지할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 3차원 비대칭 대곡면 형상을 가지는 곡판을 성형하기 위해 초기 후판 블랭크의 길이 방향 양 끝단에 가이드 홈을 구비한 가이드 암을 제안하였다.

(2) 금형 내부에 장입되는 초기 후판 블랭크를 지지하기 위해 금형 외부에 가이드 핀과 스프링 및 슬라이딩 블록 등으로 구성된 가이드 블록을 설계하였다.

(3) 블랭크 지지구조가 적용된 초기 블랭크를 이용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석 결과로써 해당 지지구조가 유연하게 블랭크를 지지함과 동시에 원활한 공정이 수행될 수 있도록 블랭크의 위치를 적절히 유도함을 알 수 있었다.

(4) 초기 후판 블랭크에 적용된 가이드 암의 폭이 20.0mm, 45.0mm 및 90.0mm 일 경우에 대한 공정 변수화 연구 및 유한요소 해석을 통해, 가이드 암의 폭이 클 수록 성형된 곡판의 치수 오차 증가를 유발할 수 있음을 확인하였다.

(5) 그러나, 가이드 암의 폭이 지나치게 좁을 경우에는 금형 내에서 블랭크를 적절히 지지하지 못함과 동시에 미끄러짐 현상이 발생할 수 있음이 예측되었다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 후판 블랭크 지지구조는 대곡면의 비대칭형 곡판을 프레스를 이용하여 성형할 경우에 유효한 지지구조로써 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과

를 바탕으로 향후에 추진될 후속연구로는 가이드 암의 폭과 위치에 따른 공정변수화 연구를 수행할 예정이며, 이를 통해 가이드 암의 적절한 폭과 위치를 결정할 수 있는 방안을 제시할 예정이다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 투자자연계형 소재 부품기술개발사업(No. 10052835)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(NRF-2012R1A5A1048294)과 이공학개인기초연구지원사업(NRF-2017R1D1A1B03032741)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] B. Staniša, V. Ivušić, 1995, Erosion Behavior and Mechanisms for Steam Turbine Rotor Blades, *Wear*, Vol. 186~187, pp. 395~400.
- [2] B. E. Lee, K. J. Riu, S. H. Shin, S. B. Kwon, 2003, Development of a Water Droplet Erosion Model for Large Steam Turbine Blades, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 1, pp. 114~121.
- [3] B. K. Kang, B. S. Kwak, M. J. Yoon, J. Y. Jeon, B. S. Kang, T. W. Ku, 2016, Tool Design and Numerical Verification for Thick Plate Forming of Hollow-Partitioned Steam Turbine Nozzle Stator, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 6, pp. 379~389.
- [4] S. C. Heo, Y. H. Seo, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, A Study on Thick Plate Forming using Flexible Forming Process and Its Application to a Simply Curved Plate, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 51, No. 1-4, pp. 103~115.
- [5] W. B. Schramm, A. J. Nachtigall, V. L. Arne, 1950, Preliminary Analysis of Effects of Air Cooling Turbine Blades on Turbojet-Engine Performance, National Advisory Committee of Aeronautics, NACA-RM-E50E22.
- [6] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [7] K. J. R. Rasmussen, T. Burns, P. Bezkorovainy, M. R. Bambach, 2003, Numerical Modelling of Stainless Steel Plates in Compression, *J. Constr. Steel Res.*, Vol. 59, No. 11, pp. 1345~1362.
- [8] T. W. Ku, B. S. Kang, J. Y. Jeon, M. J. Yoon, 2017, Thick plate support structure having large surface for blade, Korean Intellectual Property Office, No. 10-2017-0116604.
- [9] T. W. Ku, B. S. Kang, J. Y. Jeon, M. J. Yoon, 2017, The thick plate forming apparatus having large surface for blade, Korean Intellectual Property Office, No. 10-2017-0116607.