[논문] 한국소성가공학회지, 제 21 권 제 5 호, 2012
Transactions of Materials Processing, Vol.21, No.5, 2012
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2012.21.5.305

알루미늄 후판을 이용한 Moss Spherical 타입의 LNG 탱크 곡면 성형해석 및 스프링백 예측

윤종헌 [1] · 전효원 [1] · 이정환# · 김병민 [2]

Forming Analysis of A5083 Thick Plate for Moss Spherical LNG Tank and Prediction of Springback

J. H. Yoon, H. W. Jeon, J. H. Lee, B. M. Kim

(Received May 31, 2012 / Revised July 4, 2012 / Accepted July 10, 2012)

Abstract

One of the main methods of building LNG tankers uses the Moss spherical tank design since it can be precisely analyzed with respect to reliability and safety of construction by stress analysis. Aluminum alloy 5083 is generally used in the Moss spherical tank design for the wall in constructing the LNG tanker. This aluminum alloy does not have low temperature brittleness, but has good corrosion resistance, good weldability, and excellent material properties for the application. The Moss spherical tank is constructed with several sections of A5083 thick plate with curved surfaces, which are welded together. It is essential to predict the amount of springback for the deformed thick plates in design to insure a reliable construction because the structure needs to be assembled into a perfect sphere. Unless the initial construction meets the design, there are additional processing costs for reworking to meet the specifications as well as a cost penalty paid to a consumer. In this paper, FE analyses were conducted to predict the amount of springback for various forming conditions and forming processes. The various forming processes were evaluated with respect to reducing springback and compared with the conventional forming process used for curved surfaces of thick Al plate.

Key Words : LNG Tank, Moss Spherical, Thick Plate, Springback, Forming Analysis

1. 서 론

고유가 및 원자로 사고에 따른 LNG에 대한 소비량이 급증함에 따라 LNG 운송선의 수요가 증가하고 있다. 최근 지식경제부 보도자료에 의하면 전세계 LNG 운송선의80%를 우리나라가 수주 받았으며 이러한 수주량의 대부분은 저장 탱크의 안정성 및 신뢰성에 대해 정확히 분석할 수 있는 Moss spherical 형태로 제작이 진행되고 있다. LNG 운송선의 Moss spherical 저장탱크는 구 형상을 유지하기 위하여 일정한 곡률로 성형된 다수의 알루미늄 후판 패치(patch)를 용접하여 구성된다[1, 2]. 곡면 성형된 후판의 곡률이 일정하지 않을 경우, 용접 공정에서 완벽한 형상의 구를 조립하기가 어려워지므로 곡면 성형에 따른 정확한 곡률 확보와 스프링백으로 인한 후판의 탄성 복원량을 예측할 필요가 있다[3]. 또한 목표 곡률을 만족시키지 못하는 후판을 이용하여 탱크 외벽을 구성할 경우 LNG 운송선을 주문한 고객사의 저장탱크 용량을 정확하게 확보할 수 없으므로 제

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
2. 부산대학교
교신저자 : 한국기계연구원 부설 재료연구소,
E-mail: jhyoon@kims.re.kr

조 업체는 이에 따른 추가적인 패널티를 지불하게 된다. 따라서 본 논문에서는 알루미늄 후판의 곡면 가공 시 다양한 성형 조건에 따라 발생하는 탄성 복원량을 예측하고 이에 따른 성형 품질 및 성형 치수를 분석하였다.

2. 알루미늄 후판의 곡면 성형

LNG는 천연가스를 -162℃상태에서 약 600배 압축하여 액화시킨 상태의 가스이므로, LNG저장 탱크의 외벽은 저온취성에 강하며 내부식성 및 기계적 물성이 뛰어난 A5083이 주로 사용된다. A5083 후판을 적용한Moss spherical 저장탱크 외벽의 대곡면 성형 시, 블록(block)타입의 금형을 제작하여 성형하는 것은 현실적으로 불가능하여, Fig. 1과 같이 격자(lattice)형태의 금형을 사용하는 크바에르너(Kvaerner)[1]방식의 곡면 성형을 수행하게 된다. 일반적인 알루미늄 후판의 대곡면 성형은 성형하중 및 탄성 복원량을 감소시키기 위하여 온간(약400°C)에서 곡면 성형이 이루어진다. 본 논문에서는 온간 성형 시 발생하는 열전도, 대류 열전달 및 강제 냉각 등에 따른 효과를 최소화하고 성형 조건에 따른 탄성 복원량 및 최종형상을 정량적으로 관찰하기 위하여 냉간 성형 조건을 가정하여 해석을 진행한 뒤, 계속적인 연구에서 온간 성형 실험 및 해석을 진행하고자 계획하였다.

2.1 성형 금형

Moss spherical 타입의 LNG 탱크 외벽은 두께 70mm, 가로, 세로의 길이가 각각 4, 12m 의 판재를 곡면 성형한 뒤, 각각을 용접하여 구성하게 된다. 본 연구에서는 실제 대곡면 성형을 모사하기 위하여 Table 1과 같은 격자형 금형을 제작하여 실험 및 성형해석을 수행하였다. 금형 제작 시, 정확한 목표 곡률을 생성하고 판재의 표면 품질을 향상시키기 위하여 격자형 금형을 조립 후에 정밀 기계 가공을 이용하여 계단 형태의 단을 제거하였다. 성형에 사용될 소재는 크기 1186×790mm를 갖는 20, 30mm 두께의 A5083을 적용하였다.

2.2 성형 및 유한요소 해석조건

성형 조건 및 공정 조건에 따른 알루미늄 후판의 스프링백 현상과 성형 하중 등을 분석하기 위하여 후판의 두께, 금형의 곡률, 교정력 크기, 그리고 금형의 격자 간격 등을 변수로 적용하여 성형해석을 수행하였다. Table 2 에 제시된 바와 같이 Case1, 2 를 통하여 소재 두께에 따른 스프링백의 차이를 확인하였고, Case1, 4 의 비교를 통하여 과도굽힘(overbending)으로 스프링백의 차이를 확인하였다. 또한, Case2, 3 의 비교를 통하여 동일한 다이 곡률(1/1500) 및 소재두께(30mm)에 대하여 성형펀치의 곡률 차이가 있을 때의 스프링백 차이를 관찰하였다. 추가적으로 곡면 성형 중에 부과되는 교정력의 크기에 따른 스프링백 효과와 리버스 벤딩 공정을 적용하여 나타나는 스프링백 효과를 분석하였다.

다양한 성형 및 공정에 따른 유한요소 해석은 ABAQUS/Standard를 이용하여 수행하였으며, 해석에 적용된 A5083 후판의 물성 데이터는 Fig. 2와 같이 준정적 변형률속도(0.001/sec) 에서 인장시험을 수행하여 구성하였다. 1/4 모델링을 수행하여 해석의 효율을 높였으며 상세한 유한요소 해석조건은 Table 3에 명시하였다. 곡면 성형된 후판의 스프링백 양은 상부 펀치를 제거한 뒤 복원되는 탄성 복원량을 측정하여 금형의 곡률과 비교하였다.

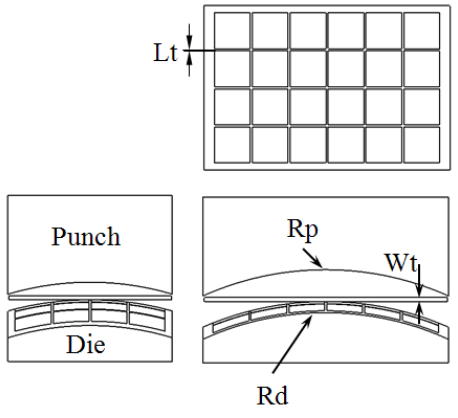


Fig. 1 Schematic diagram of lattice type die

Table 1 Dimension of lattice type die

Length (mm×mm)	1200×800
Lattice thickness (mm)	20
Lattice space (mm)	175
Die radius (mm)	1500
Punch radius (mm)	1520

Table 2 Forming conditions

	Rd(mm)	Rp(mm)	Wt(mm)
Case1	1500	1520	20
Case2	1500	1530	30
Case3	1500	1520	30
Case4	1000	1020	20

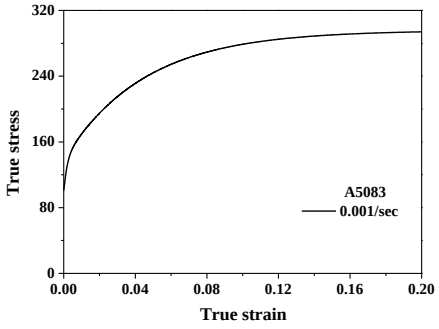


Fig. 2 Stress-strain curve for A5083 at room temperature

Table 3 Simulation conditions

Simulation code	ABAQUS/Standard
Mesh size (mm)	6 × 6 × 6.7
Mesh type	C3D8IH
Number of meshes	19602
Friction coefficient	0.1
Young's modulus(GPa)	70
Poisson ratio	0.33

3. 곡면성형 해석결과

2.2장에서 제시된 알루미늄 후판의 두께, 금형의 곡률, 교정력 크기, 그리고 금형의 격자 간격 등의 다양한 성형 조건에 따른 탄성 복원량을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 x축 방향으로 후판의 성형 후 치수를 측정하였다. Fig. 3에서 R_d는 하무다이의 곡률을, R_w는 탄성복원 후에 후판의 곡률을 나타낸다. 곡면 성형된 후판은 수평, 수직 및 대각선 방향 모두 동일한 곡률을 갖고 있으므로 탄성 복원량은 후판의 가장 긴 변인 x축 방향으로 측정하였다.

3.1 금형 곡률 및 소재 두께에 따른 효과

성형조건 Case1, 2, 3, 4에 따른 탄성 복원량은 Fig. 4에서 측정된 것과 같이 x=560mm에서 각각

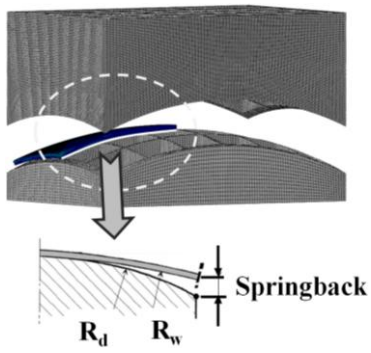
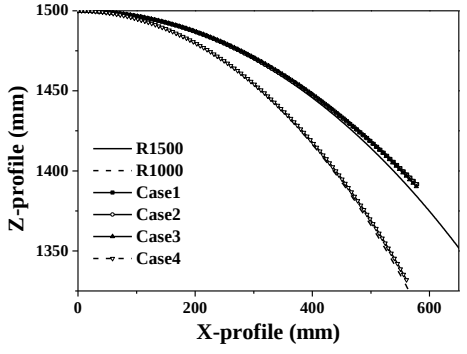
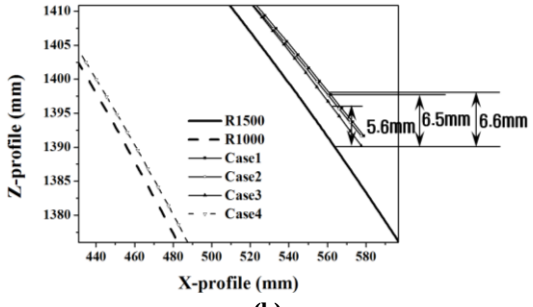


Fig. 3 Position of springback measurement



(a)



(b)

Fig. 4 Comparison of springback for Case1, 2, 3, and 4: (a) profile of deformed Al sheet; (b) zoom-in view

6.6, 6.5, 5.6, 3.5mm이다. Case4에서 가장 적은 탄성 복원량 3.5mm가 발생하였으며, Case1의 경우 가장 큰 탄성 복원량인 6.6mm가 발생하였다. Case4는 기준 곡률인 1/1500 (Case 1)에 비하여 곡률을 30% 증가시켜 1/1000(mm)로 과도 굽힘 한 경우로서, Fig. 5와 같이 네 가지 경우 중에서 후판의 두께 방향으로 가장 많은 소성 변형률이 발생하여 탄성

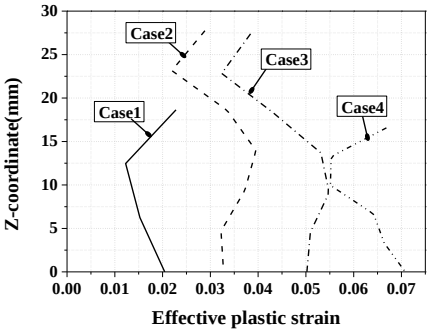


Fig. 5 Distribution of effective plastic strain along thickness direction for case1, 2, 3, and 4

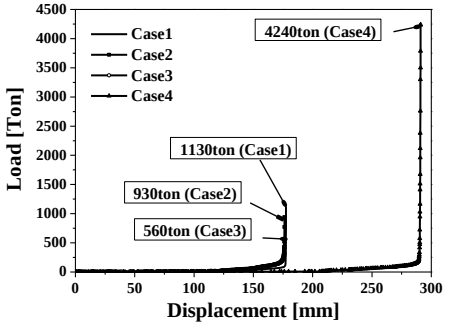


Fig. 6 Comparison of punch loads for Case 1, 2, 3, and 4

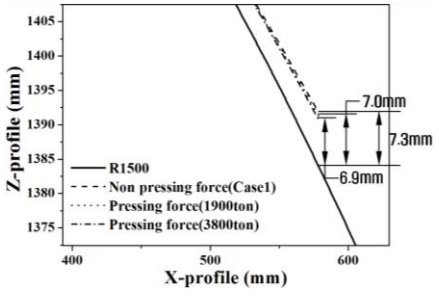


Fig. 7 Comparison of springback according to pressing forces

복원량이 감소되었다고 판단된다. 그렇지만 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 Case 1, 2, 3와 비교하여 성형 하중이 급격히 증가하는 단점을 갖는다. Case1과 2를 비교함으로써 소재의 두께에 따른 탄성 복원량을 관찰하였다. 동일한 곡률로 곡면성형을 하였을 경우, 소재가 두꺼울수록 탄성 복원량이 감소하는 경향을 보인다. 또한, Case2와 3를 비교함으로써 동일한 후판 두께(30mm) 및 다이 곡률

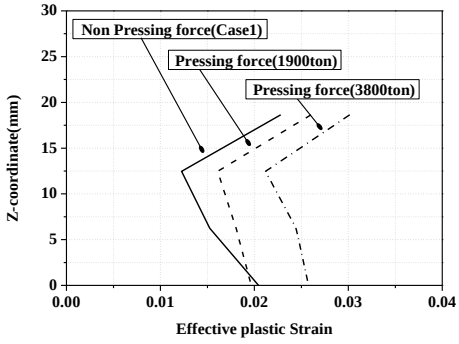


Fig. 8 Distribution of effective plastic strain along thickness direction according to pressing forces

(1/1500)에 대하여 펀치곡률을 다르게(1/1520, 1/1530) 적용하여 탄성복원량을 관찰하였다.

Case 3의 경우 금형과 맞닿는 하부 곡률은 Case 2와 동일하면서 상부 펀치는 곡률이 상대적으로 큰 펀치를 사용하여 성형하였다. 이 경우 탄성 복원량이 Case 2와 비교하여 14% 감소할 뿐만 아니라 성형 하중도 41% 감소하는 결과를 보였다. Case 3 성형의 경우 후판의 하단면 즉, 하부 다이와 접촉하는 면의 곡률은 Case 2와 동일하지만 상부 펀치와 접촉하는 면의 곡률은 증가된 곡률을 갖기 때문에 후판의 두께 별 유효 소성변형률이 크게 발생하여 탄성 복원량이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 곡률이 다르게 설계된 상, 하부의 금형이 완전히 닫힌 시점에서 후판은 금형에 완벽하게 접촉되지 않으므로 성형 하중이 감소하는 결과를 보인다(Fig. 6).

3.2 교정력 크기에 따른 효과

교정력(pressing force) 크기에 따른 탄성 복원량 증감 효과를 관찰하기 위하여 Table1의 Case1 에서 측정된 하중을 기준으로 추가적인 교정력을 부과하였다. 교정력 크기는 Case1의 최대하중인 1130톤의 1.5배인 1900톤, 그리고 3800ton을 부과하였다. Fig. 7에 제시된 바와 같이 교정력 크기에 따라 탄성 복원량은 x=578mm 에서 7.3(Case1), 7.0, 6.9mm로 교정력 크기가 증가할수록 감소하고 있다. 이러한 원인으로는 교정력 부과에 따라 후판의 두께 방향 압축응력이 증가하기 때문으로 판단되며 그 효과는 매우 작은 것으로 예측되었다.

3.3 격자 두께에 따른 효과

LNG 탱크용 후판의 곡면 대곡면 성형 시 블록

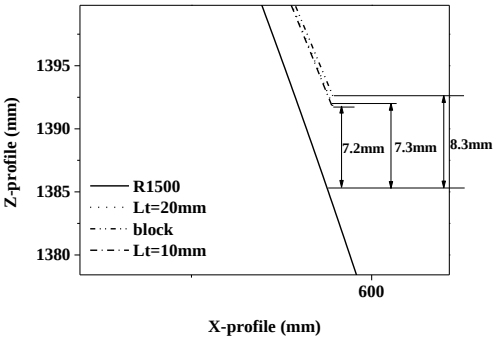


Fig. 9 Comparison of springback according to lattice thickness of die

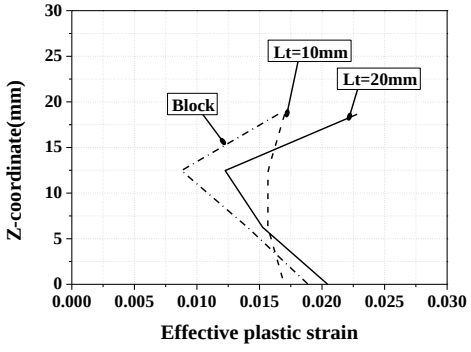


Fig.10 Distribution of effective plastic strain along thickness direction according to lattice thickness of die

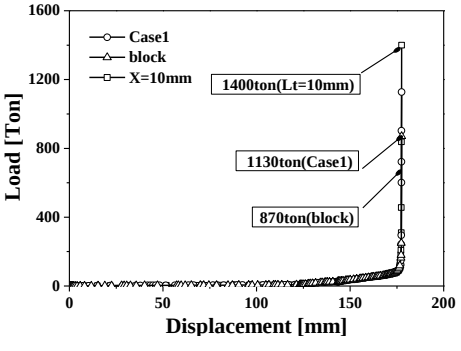


Fig.11 Comparison of punch loads according to lattice thickness of die

타입의 금형이 아닌 격자 형태의 금형을 이용하여 성형하게 된다. 접촉 면적의 크기에 따른 탄성 복원량을 관찰하기 위하여 격자 두께를 변화시켜 성형 해석을 수행하였다. 금형의 기준 격자두께 L_t=20mm와 L_t=10mm의 격자 금형을 이용하여 탄

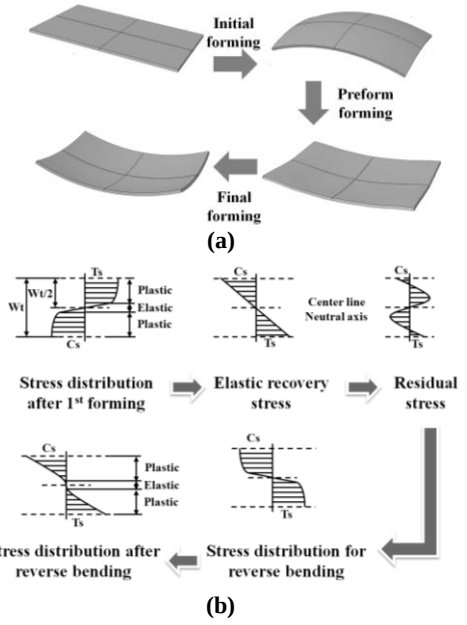


Fig.12 Reverse bending process and stress distribution

성 복원량을 측정하였다. 블록형 금형과 비교하여 격자 두께가 줄어들수록 탄성 복원량은 8.3(block type), 7.3, 7.2mm 로 탄성 복원량이 미세하게 감소하고 있다. 그러나 격자 간격이 줄어듦에 따라 펀치 하중이 급격하게 증가(Fig. 11)될 뿐만 아니라 후판 표면에 국부적인 찍힘 현상이 발생하게 되므로 기 설계된 격자 두께 20mm 이하로 격자 두께를 설정하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

3.4 리버스벤딩 효과

본 장에서는 알루미늄 후판의 곡면 성형 시 발생하는 탄성 복원량을 감소시키기 위하여 리버스 벤딩 공정을 제안하였다. 리버스 벤딩 공정은 Fig. 12에서와 같이 1차 공정에서 목표 곡률과 반대되는 곡률의 예비 성형체를 성형한 뒤, 2차 공정을 거쳐 3차 공정에서 최종적인 목표 곡률로 성형하는 공정이다. 리버스 벤딩 공정을 이용한 후판 성형 시, 곡률의 부호(sign)가 급격하게 바뀌어 후판 표면 품질에 문제가 발생할 가능성이 있기 때문에 1차와 3차 사이에 추가적인 예비 공정을 추가하여 총 3단계로 공정을 설계하였다. 1차 공정을 거친 후판은 탄성 복원 후에 잔류응력이 발생하게 된다. 인장이 발생했던 후판 상단면은 압축 잔류응력이, 압축력이 작용했던 후판의 하단면은 인

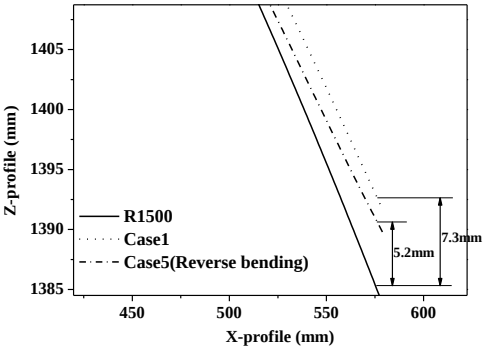


Fig.13 Comparison of springback for reverse bending

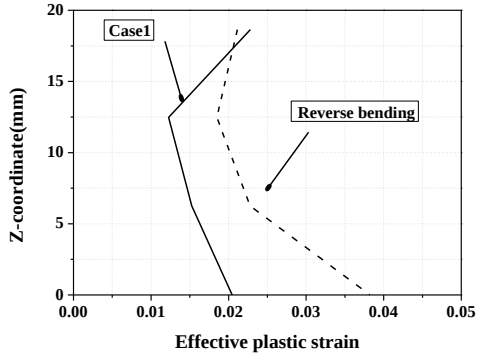


Fig.14 Distribution of effective plastic strain along thickness direction according to reverse bending

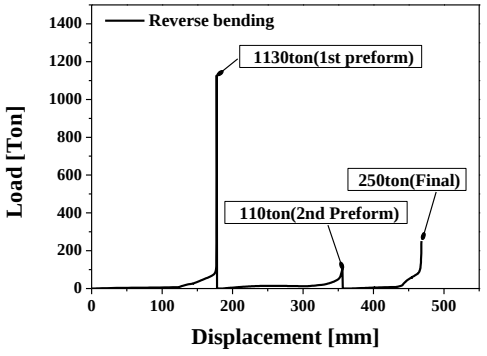


Fig.15 Punch force for reverse bending

장 잔류응력이 발생하게 된다(Fig. 12(b)). 연속적인 2, 3차 공정에서 1차 공정과 반대되는 곡률로 재성형할 경우 이러한 잔류응력이 2차 공정에서 발생되는 응력 분포를 상쇄시켜 탄성 복원량을 감소시키는 것으로 판단된다. 리버스 벤딩 공정을 적용하였을 경우 탄성 복원량은 5.2mm 로서 Case1의 탄성 복원량 7.3mm을 29% 저감시키는 효과를 나타내고 있다. 성형 하중의 경우 Case 1과 비슷한 수준이 발생되지만 공정 수의 증가로 인하여 추가적인 시설비와 자동화 비용이 고려되어야 할 것으로 판단된다. LNG 탱크선에 적용되는 한 변의 길이가 수 미터에서 수십 미터에 이르는 패치형 곡면 후판은 용적에 따라 100~250장까지 사용되는 점을 고려할 때 대형 LNG 탱크선 수주에 따라 리버스 벤딩 공정의 적용을 검토해 볼 가치가 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 알루미늄 후판의 냉간 곡면 성형 시, 후판의 두께가 증가할수록, 성형 곡률이 증가할수록 탄성 복원량은 감소한다.

(2) 하부 금형의 곡률을 후판의 목표 곡률로 설정할 경우 곡률이 감소된 상부 펀치를 사용하여 곡면 성형을 수행할 경우 탄성 복원량을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 성형 하중을 낮출 수 있다.

(3) 성형 완료 후에 상부 펀치에 부과되는 교정력의 크기가 증가할수록 탄성 복원량은 미세하게 감소되지만 성형하중은 급격히 증가된다.

(4) 판재와 접촉하는 금형의 면적이 증가함에 따라 탄성 복원량은 증가하지만 성형 판재의 표면 품질을 고려할 때 격자 금형의 두께를 급격히 줄일 수 없다.

(5) 리버스 벤딩 공정을 적용한 알루미늄 후판의 곡면 성형 시, 탄성 복원량을 29% 낮출 수 있었으며 성형 하중 역시 급격히 증가되지 않았다.

참 고 문 헌

[1] J. Anttila, J. Gustafsson, M. Heinakari, J. Linja, M. Vaihinenm, 1996, Spherical LNG-tank and a Production Method for Such a Tank, Patent number: 5484098, US.

[2] Y. Miyagi, M. Hino, M. Fujino, H. Yanai, 1985, Properties of Thick 5083-0 Aluminum Alloy Plates for the Equatorial Ring of a Spherical LNG Cargo Tank, J. Mater. Energy Syst., Vol. 6, No. 4, pp.

273~278.

[3] N. Asna, 2001, On Springback of Double-curved Autobody Panels, Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, No. 1, pp. 5~37.

[4] Japan Shipbuilding Research Association, 1976, Investigation Report on Safety of LNG Tankers, Research Data, No. 50R, p. 153.

[5] Y. Miyagi, M. Hino, K. Ikeda, M. Aoki, 1978, R & D Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 28, No. 4, p. 52.

[6] K. Asano, Y. Kitao, M. Hino, 1976, R & D Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 26, No. 1, p. 4.