

격자형 하이브리드 금형에 의한 열간 알루미늄후판 곡면성형공정해석 및 실험

이인규¹ · 이정민² · 손영기³ · 이찬주³ · 김병민[#]

Experimental and FE Analyses of Hot Curvature-Forming for Aluminum Thick Plate Using Grid-Typed Hybrid Die

I. K. Lee, J. M. Lee, Y. K. Son, C. J. Lee, B. M. Kim

(Received April 19, 2011 / Revised June 13, 2011 / Accepted June 14, 2011)

Abstract

The hot curvature-forming of large aluminum thick plate using a grid-typed hybrid die is a process for the production of a spherical LNG tank. Many variables such as the initial die surface quality, grid size, grid thickness, size of blank plate and cooling line design, control the success of the process. In addition, the plate used in this process is generally larger than 10×10m in size. Thus, it is very difficult to predict the surface characteristics of the plate during forming and to measure the different parameters due to the high cost of the experiments. In order to optimize the process design for the grid-type die, the development of an analytical method to predict the surface characteristics of the final product in hot curvature-forming is needed. This paper described the development of the method and procedures for FE simulations of the hot curvature-forming process, including hot forming, air flow, cooling, and thermal deformation analyses. An experiment for a small scale model of the process was conducted to check the validity of the numerical method. The results showed that the curvature of the plate in the analysis agrees well with that of the experiment within 0.037 and 0.016% tolerance margins for its side and corner, respectively.

Key Words : Grid-typed Hybrid Die, LNG-Tank, Hot Curvature-forming, Finite Element Analysis, Aluminum Thick Plate, Compressed Air Cooling

1. 서 론

대형 AI 후판의 열간 곡면성형기술은 구형 LNG 탱크의 셸(Shell) 곡면(Fig. 1)을 제조하기 위한 기술로써 1995년 Kvaerner Masa-Yard 사(핀란드)에서 처음 개발되었다[1, 2]. 이 공정의 특징은 후판의 곡면성형과 냉각시 금형과의 접촉면적을 최소화하고 성형된 후판의 냉각시간을 단축 시키기 위해 내부에 냉각노즐이 설치된 격자형 하이브리드 금형을 사용하는 것이다. Fig. 1은 열간 곡면성형

공정의 개략도를 나타낸 것이다.

공정은 크게 후판의 이송과 가열, 성형, 냉각, 반출공정으로 이루어져 있으며 레일을 따라 순차적으로 수행된다. 후판 가열 및 성형온도는 약 400~430℃이며 성형 후 후판은 금형이 닫힌 상태에서 냉각노즐에서 분사된 압축공기에 의해 냉각된다[1]. 보통 이러한 공정에 사용되는 후판의 크기는 8m×12m로 4m×12m 크기의 후판 2장을 용접하여 제조된다. 현실적으로 이런 크기의 후판을 성형할 수 있는 유압프레스는 존재하지 않는다.

1. 부산대학교 하이브리드 소재 솔루션 협동 과정
2. 부산대학교 PNU-IFAM JRC
3. 부산대학교 정밀가공시스템전공
교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail:bmkim@pusan.ac.kr

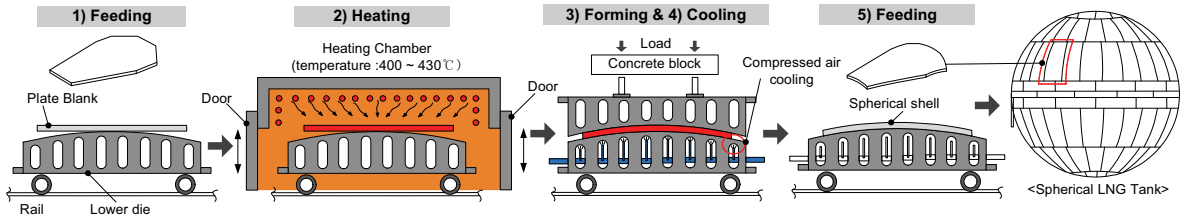


Fig. 1 Schematic drawing of hot curvature-forming process for large Al plate

따라서 상금형 위에 설치된 별도의 콘크리트 더미의 무게를 통해 후판은 성형된다[1].

대형 AI 후판의 곡면성형에서 기존의 냉간 단단 포밍공법 대신에 열간 곡면성형을 사용하는 근본적인 이유는 성형시 후판의 스프링백(Springback)을 최소화하고 생산성을 극대화시키기 위한 것이다 [3~5]. 그러나 이러한 공정은 다양한 공정변수(금형 곡면치수와 격자크기, 냉각라인, 후판 크기 등)에 의존하고 또한 냉각시 후판의 변형(뒤틀림)에 의해 최종 곡면형상제어가 어렵다는 단점이 있다. 더욱이 성형장비 구축에 막대한 초기 투자비용이 소요되기 때문에 다양한 공정변수에 대한 실험적인 접근도 매우 어렵다. 따라서 열간 곡면성형의 금형 및 공정설계기술을 효과적으로 확보하기 위해서는 무엇보다 해석적인 접근방법이 필요하다[3~5].

본 논문의 목적은 구형 LNG 탱크제조를 위한 기초연구로써 AI 후판의 열간 곡면성형공정의 해석방법을 개발하기 위한 것이다. 이러한 해석에는 후판의 열간성형해석과 금형내 압축공기의 유동해석, 성형된 후판의 냉각 및 열변형해석을 포함하고 있다. 일련의 해석을 통해 성형동안 발생하는 후판의 전형적인 결함을 파악하고 냉각변형에 의한 최종 후판 곡면형상을 예측하였다. 마지막으로 축소모델에 대한 열간 곡면성형공정 실험을 수행하여 개발된 해석방법의 유효성을 검증하였다.

2. 해석절차 및 조건

2.1 해석절차 및 격자형 금형형상

Fig. 2 은 열간 곡면성형공정의 해석절차를 나타낸 것이다. 순서는 먼저 격자 금형을 이용하여 상온에서 430°C로 가열된 AI 후판의 열간성형해석을 수행하고 이후 금형이 닫힌 상태에서 100°C까지 1차 냉각해석을 수행한다. 끝으로 상금형을 제거하고 후판이 상온(25°C)에 도달할 때까지 다시 2차 냉각해석을 수행하여 최종 후판 곡면형상을 예측한다. 여기서 열간성형과 2차 냉각해석은 공기의 자

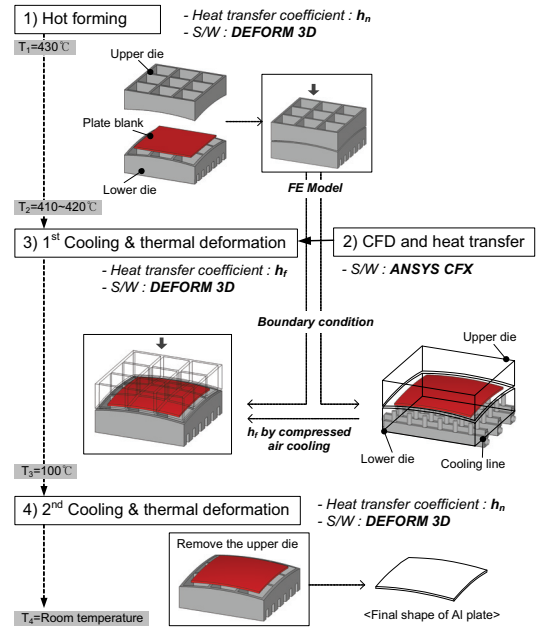


Fig. 2 Procedure and sorts of FE simulations for analysis of hot curvature-forming process

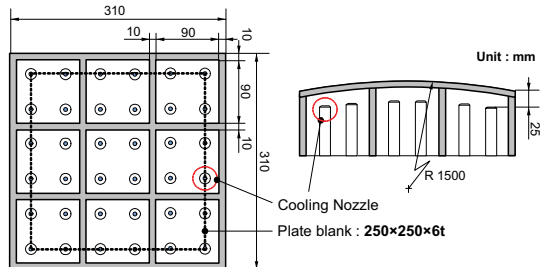


Fig. 3 Dimensions of grid typed die and Al plate for FE simulation of hot curvature-forming process

연대류계수값(h_n : Natural convection coefficient)을 사용하고 1차 냉각해석은 압축공기 냉각에 의한 강제대류계수값(h_f : Forced convection coefficient)을 사용한다. h_f 값은 추가적인 금형내 노즐에서 분사된 압축공기의 유동해석을 통해 도출된다[6].

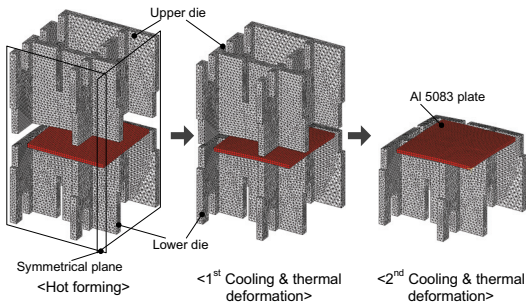


Fig. 4 FE models of forming and cooling analyses of Al 5083 plate

Table 1 FE simulation conditions of hot forming and cooling, thermal deformation of Al plate

Items	Value
Material of Al plate	Al 5083-O
Material of upper and lower die	AISI H13
Initial temp. of plate and die (°C)	430 and 20
Upper die speed (mm/s)	100
Friction factor (<i>m</i>)	0.6
Interface-HTC h_c ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	4000
h_n ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	20
h_f ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) by compressed air	CFD analysis

Fig.3은 열간 곡면성형해석을 위한 격자형 금형과 Al 후판의 치수를 나타낸 것이다. 후판 크기는 250×250×6t(mm)이며 금형의 곡면치수는 R1500mm로 설정하였다. 금형 격자는 정사각형 90×90mm이며 격자살 두께는 10mm이다. 냉각노즐과 금형곡면과의 거리는 25mm가 되도록 설계하였다.

2.2 성형 및 냉각해석 조건

Fig. 4는 Al후판의 열간성형 및 냉각해석을 위한 초기 해석모델을 나타낸 것이다. 해석은 DEFORM 3D[7]를 이용하였으며 모델의 대칭성을 고려하여 1/4단면을 취하였다. 전반적인 해석조건은 Table 1에 나타내었다. 후판 소재는 LNG의 저장온도가 약 -163°C이기 때문에 극저온에서 기계적 특성이 우수한 Al 5083[8]을 적용하였다. 열간성형과 2차 냉각 해석에서는 $h_n=20W/m^2 \text{ } ^\circ C$ [9]을 사용하였으며 1차 냉각 해석에서는 유동해석을 통해 얻어진 h_f 값을 사용하였다. 해석에서 금형은 강체로, 후판은 탄소성체로 설정하였으며 Al 5083의 고온거동은 고온유동응력곡선[10]과 탄성계수(E), 열팽창계수(CTE)로 정의하였다. Table 2에 온도변화에 따른 Al 5083의 E와

Table 2 E and CTE of Al 5083 for different temperatures

Temp.	E(GPa)	Temp.	CTE($\mu/m \text{ } ^\circ C$)
250	49.027	100	2.1×10^{-5}
300	48.316	200	2.3×10^{-5}
350	39.312	300	2.5×10^{-5}
400	33.574	400	2.7×10^{-5}
450	18.795	450	2.8×10^{-5}

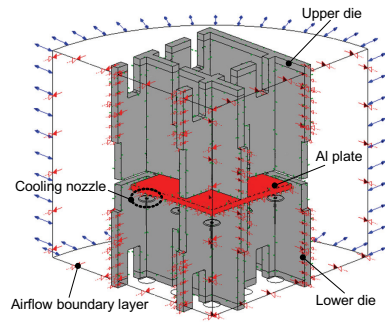


Fig. 5 FE model for CFX analysis of compressed air

Table 3 Physical Properties of air, die and Al 5083

Items	Air	Die	Al plate
Specific heat ($J/kg \text{ } ^\circ C$)	1004.4	460	900
Heat conductivity($W/m \text{ } ^\circ C$)	0.0261	14.4	117
Density (kg/m^3)	1.284	7800	2660
Initial temp. (°C)	20	20	430

kinematic coefficient of viscosity (kg/ms) :air 1.831×10^{-5}

Table 4 Jet condition of compressed air

Items	Value
Jet velocity of air (m/s)	50m/s
Diameter of nozzle orifice (mm)	3
Atmospheric temperature (°C)	20
Acceleration of gravity (m/s^2)	-9.8
Air pressure (atm)	1

CTE를 나타내었다. 마찰상수(*m*)는 일반적인 Al의 열간 무윤활 성형조건인 0.6으로 가정하였다[9].

2.3 유동 및 열전달 해석조건

Fig. 5는 금형내 공기의 유동해석을 위한 초기 해석모델을 나타낸 것이다. 해석모델은 성형해석 후 초기 1차 냉각/열변형해석 모델과 동일하며 냉각노즐과 공기의 유동층을 추가시켜 최종 모델을 완성

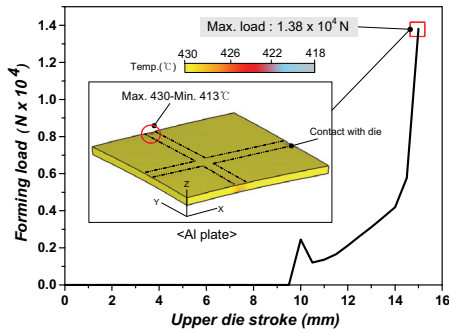


Fig. 6 Forming load – stroke curve and temperature distributions of Al plate after forming analysis

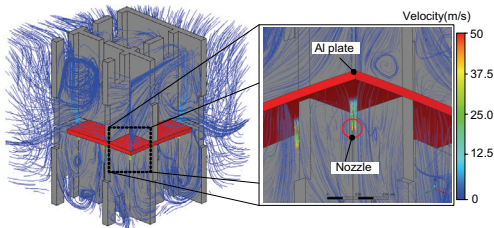


Fig. 7 Velocity distributions of air released by cooling nozzle in CFX analysis

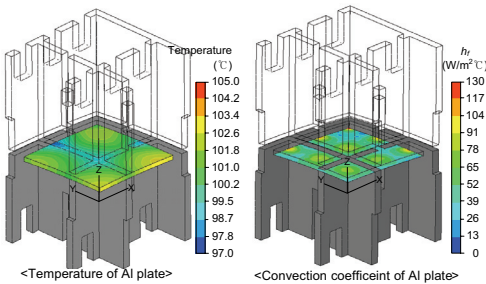


Fig. 8 Temperature and h_f distributions of Al plate after 200sec in CFX analysis

하였다. 모델에서 후판은 완전한 R1500 mm의 곡률로써 금형과 이상적으로 접촉한다고 가정하였다.

Table 3은 해석에 사용된 공기[6]와 금형[11], Al 후판[8]의 열적 물성치를 나타낸 것이다. 본 유동해석에서 초기 금형과 후판온도는 성형에 의한 온도변화를 고려하지 않고 초기값을 그대로 사용하였다. Table 4는 압축공기의 분사조건을 나타낸 것이다. 냉각노즐은 하금형에만 존재하며 노즐 직경은 3mm, 분사속도는 50m/s로 하였다. 해석은 ANSYS CFX[12]를 이용하였으며 후판 온도가 100℃ 전후가 될 때까지 수행하였다.

3. 해석결과

3.1 열간성형 및 유동해석 결과

Fig. 6은 열간성형해석 결과로써 하중-스트로크 곡선과 후판의 온도변화를 나타낸 것이다. 총 성형시간은 0.15sec(stroke 15mm)이며 상금형을 정확히 초기 소재두께(6t)까지 하강시켰다. 하중은 성형완료시점에서 급격히 증가하여 최대값($1.38 \times 10^4 \text{N}$)을 나타내었다. 후판은 금형과 접촉한 부위에서 아주 국부적으로 일부 온도변화가 관찰되었지만 대부분 영역에서 초기 온도를 유지하였다. 따라서 유동해석에서 초기 금형과 후판의 온도의 사용은 해석결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 유동해석결과로써 금형내 공기의 유속 분포를 나타낸 것이다. 노즐에서 분사된 공기는 후판 하단부를 집중적으로 냉각하였으며 이후 후판과 하금형 사이의 틈새를 통해 상금형으로 이동하였다. Fig. 8은 후판의 온도와 h_f 분포를 나타낸 것이다. 총 냉각시간은 200sec이며 후판 온도는 최대 105℃에서 최소 97℃로 금형과 접촉한 부위에서 온도감소가 두드러지게 나타났다. 이 때 후판의 최대 h_f 분포는 $130 \text{W/m}^2\text{°C}$ 이며 냉각노즐이 위치한 지점에서 나타났다. 이러한 분포는 냉각초기(5sec)초까지를 제외하고 냉각시간(200sec)동안 일정하게 유지되었다. 이후 h_f 분포는 1차 냉각해석에서 후판의 초기 대류계수 조건으로 사용되었다.

3.2 냉각해석 결과

Fig. 9는 1차 냉각해석 결과로써 냉각시간에 따른 후판 변형에 의한 상금형의 반력을 나타낸 것이다. 총 냉각시간은 200sec로 앞선 유동해석과 동일하다. 반력은 75sec를 기점(후판온도 250℃)으로 온도가 감소할수록 완만하게 상승하였으며 200sec지점에서 $1.308 \times 10^4 \text{N}$ 으로 성형하중과 유사하였다.

또한 Fig. 9에 1차 냉각과 유동해석에서의 후판 온도변화를 비교하였다. 온도가 감소할수록 후판의 최대/최소온도차(T_d)는 감소하였으며 냉각완료시점에서 1차 냉각해석은 8℃, 유동해석은 5℃로 나타났다. 후판의 온도감소경향은 두 해석이 서로 비슷하지만 전반적으로 유동해석의 온도값이 약간 낮게 나타났다. 이것은 1차 냉각시 후판의 변형과 체적감소(열수축)로 인해 금형과의 접촉면적(열전달 면적)이 유동해석에 비해 감소되었기 때

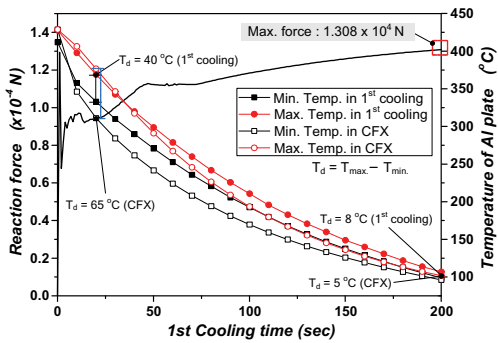


Fig. 9 Reaction force of upper die and max./min. temperature of Al plate with cooling time in 1st cooling and CFX analysis

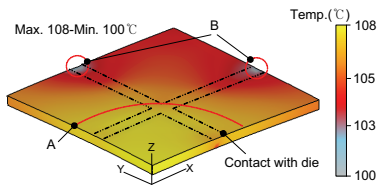


Fig.10 Temperature distribution of Al plate at cooling time 200sec in 1st cooling

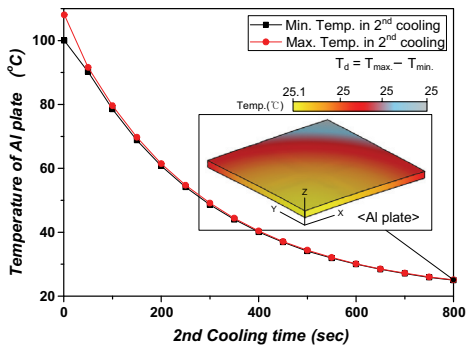


Fig.11 Max./min. temperatures of Al plate with cooling time in 2nd cooling

문이다. Fig. 10 은 냉각시간 200sec 에서 후판의 온도분포를 나타낸 것이다. 후판 중앙부(A)와 금형과의 접촉부 온도는 앞선 유동해석(Fig. 9)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 결과적으로 냉각시 상금형에 가하는 후판의 압력은 금형과 접촉한 B 점에 집중된다.

Fig. 11 은 2 차 냉각해석결과로써 냉각시간에 따른 후판의 최대/최소 온도변화를 나타낸 것이다. 총 냉각시간은 800sec 이며 냉각 완료시점에서 후판의 최대/최소 온도차는 0.1°C로 거의 발생하지

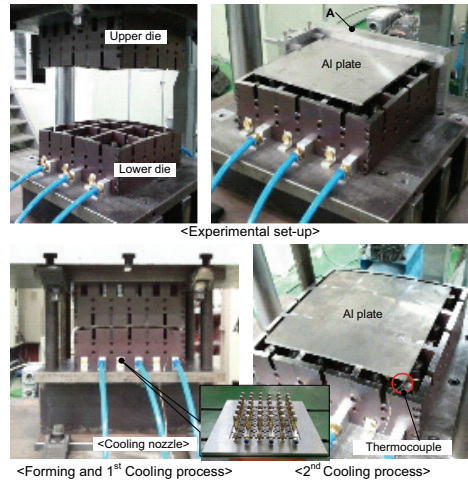


Fig.12 Experimental set-up and forming/cooling process of Al plate for hot curvature-forming

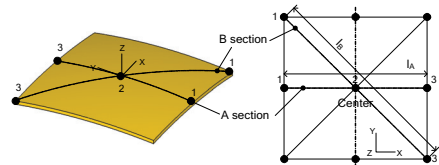


Fig.13 Curvature measurements of Al plate

않았다. 이것은 상금형에 의한 가압이 없어 후판의 중앙을 제외하고는 금형과 접촉하지 않기 때문이다.

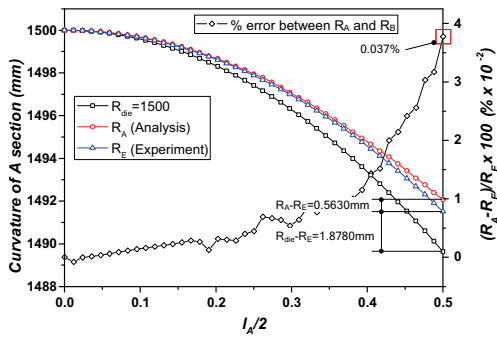
4. 열간 곡면성형실험 및 결과

4.1 실험조건

해석의 유효성을 검증하기 위해 Fig. 3과 동일한 형상의 금형과 냉각노즐에 대해 열간 곡면성형실험을 수행하였다. Fig. 12는 실험을 위한 장비셋업(Set-up)과 성형 및 냉각공정을 나타낸 것이다. 냉각노즐은 유속계를 이용하여 공기유속이 50m/s가 되도록 조절하였다. Al후판은 가열로에서 470°C로 가열된 후 치구(Fig. 12 A)를 이용하여 정확히 하금형 중심에 위치시켰다. 이후 후판이 430°C가 되는 시점에서 성형을 수행하였으며 냉각동안 온도측정을 위해 후판 모서리에 열전대를 삽입하였다. 실험조건은 해석과 동일하다.

4.2 후판 곡률측정 및 온도측정

Fig. 13은 후판의 곡률 측정부를 나타낸 것이다.



(a)

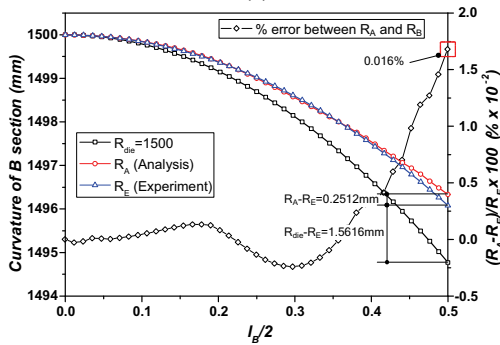


Fig.14 (a) Curvatures(A section) of Al plates in analysis and experiment and their relative errors, (b) Curvatures(B section) of Al plates in analysis and experiment and their relative errors

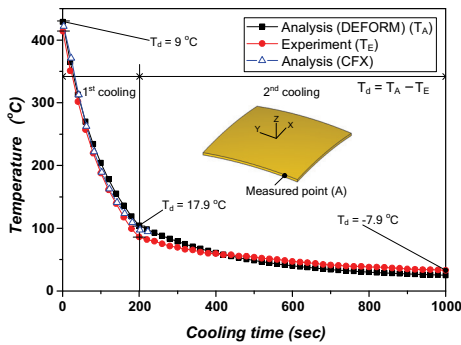


Fig.15 Temperatures of A point at Al plate in 1st and 2nd cooling process

곡률은 후판 중심에서 양변(A section)과 양모서리 코너(B section)까지 두 단면에 대해 측정되었다. 실험에서 곡률은 3차원측정기로 측정된 각 단면의 세 지점(1-2-3)을 연결하는 3점 원호로 정의되었으며 해석은 각 단면에 위치하는 노드(node)의 좌표로써 정의되었다.

Fig. 14는 실험과 해석으로부터 얻어진 후판 곡

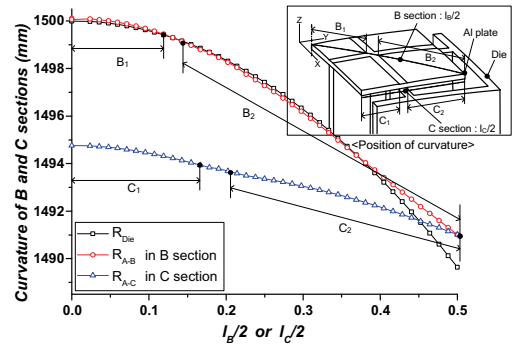


Fig.16 Curvature of Al plate after forming analysis and typical curvature defects

률과 상대오차를 나타낸 것이다. R_{die} 는 하금형의 곡률이며 R_A 와 R_E 는 각각 해석과 실험에서 측정된 곡률이다. 해석은 실험과 비교하여 A단면에서 0.2512mm(0.037% error), B단면에서 0.5630mm(0.016% error)의 최대오차량을 가지며 비교적 정확한 결과를 예측하였다. Fig. 15는 냉각시간에 따른 해석과 실험에서의 후판 온도변화(A지점)를 비교한 것이다. 후판의 온도감소는 1차 냉각에서 실험이 해석(DEFORM)보다 더 높은 반면에 2차 냉각에서는 오히려 낮게 나타났다. 온도차이(T_d)는 200sec에서 17.9°C, 1000sec에서는 -7.9°C를 보였다.

사실상 이러한 온도차이의 원인은 명확하지 않다. 본 해석에서는 금형과 후판 사이의 계면열전달계수(h_c)가 압력에 상관없이 일정하다고 가정하였지만 실제로는 압력이 커질수록 증가한다[13]. 이것은 1차 냉각시 실험에서 감소된 후판의 온도만큼 금형의 온도가 증가하였다는 것을 의미하며 이로 인해 2차 냉각시 후판의 온도감소를 늦추는 하나의 원인으로 볼 수 있다. 전반적으로 해석과 실험은 동일한 온도 감소 경향을 보이며 서로 유사한 값을 나타내었다. 특히 유동해석(CFX)을 통해 얻어진 후판의 온도는 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 이것은 금형내 압축공기의 유동해석을 통해 h_f 값을 예측하는 방법이 타당하다는 것을 의미한다. 결과적으로 본 연구에서 제안된 일련의 해석절차는 열간 곡면성형에서 다양한 공정변수에 대한 곡면형상을 예측하는데 상당히 유효하다고 판단된다.

5. 고찰

Fig. 16은 성형해석후 후판의 곡률과 곡률오차의 유형을 나타낸 것이다. 격자 금형을 이용한 곡

면성형의 경우, 성형단계에서 이미 상당한 곡률오차를 포함하고 있다. 곡률 오차는 크게 격자간격에 의해 발생하는 곡면형상오차(B_1, C_1), 코너부의 미성형(B_2, C_2), 그리고 변의 웨이브(C_1, C_2)로 나눌 수 있다. 실질적으로 곡면성형된 후판은 여러 개를 서로 용접하여 구형탱크로 조립되기 때문에 무엇보다 후판의 곡면외곽치수가 매우 중요하다. 따라서 곡률결함을 없애기 위해 초기 격자설계시 후판의 블랭크의 외각과 격자살을 동일하게 위치시키는 것이 필요하다.

더불어 격자설계는 후판의 유동특성을 고려하기 보다는 격자살 위치와 간격조정을 통해 성형된 후판 형상이 형상학적으로 설계된 곡면을 정확히 구현하는 것에 초점이 맞추어져야 한다. 다시 말해 최종 후판의 변형이 초기 금형 곡면형상에만 의존하도록 격자설계가 이루어져야 한다. 또한 이 경우 Fig. 10 에서와 같이 냉각시 후판 변형에 의해 금형에 작용하는 국부적인 압력을 분산시킬 수 있어 금형 강도적인 측면에서도 매우 유리할 것이다.

냉각동안 후판의 변형에 의해 발생하는 반력은 성형하중과 거의 유사하며 또한 열수축으로 인해 후판의 체적은 조금씩 감소한다. 따라서 냉각동안 후판을 금형과 접촉시키기 위해서는 최소한 성형하중 이상의 압력으로 금형을 가압할 필요가 있다. 또한 이것은 후판의 냉각시간도 단축시킬 수 있다. 향후 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 격자 및 금형 곡면설계 방법에 대해 논의될 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 AI 후판의 열간 곡면성형공정을 해석적으로 구현하기 위해 성형해석과 공기유동해석 및 냉각해석을 수행하였다. 또한 해석과정의 유효성을 검증하기 위해 AI 후판의 열간 곡면성형공정 실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 격자금형을 이용한 AI 후판 곡면성형시 발생하는 전형적인 곡률결함은 곡면형상오차, 미성형, 모서리의 웨이브가 있다. 이러한 결함을 없애기 위해서는 격자설계시 격자살을 후판 외곽과 일치시켜야 한다.

(2) 성형 후 1 차 냉각시 후판과 금형의 접촉을 계속적으로 유지하기 위해서는 최소 성형하중 이상의 압력을 금형에 가해야 한다.

(3) 1 차 냉각시 압축공기 분사에 의한 냉각성능은 유동해석으로부터 도출된 후판 표면에 발생하는 강제대류계수값으로 대표될 수 있다.

(4) 해석으로부터 얻어진 후판의 곡률과 온도분포가 실험결과와 잘 일치하였다. 따라서 열간 곡면성형공정을 구현하기 위해 본 연구에서 제안된 일련의 해석절차는 매우 유효하며 공정변수 평가 및 격자설계, 금형 곡면설계를 위한 해석방법으로 적절하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 산업원천 기술개발사업과 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Jari Anttila, et al., 1996, Spherical LNG-tank and a production method for a such tank, United state patent, No. 5,529,239.
- [2] Frank R. Baysinger, 1980, Liquefied natural gas tank construction, United state patent, No. 4,182,235.
- [3] Utpal Borah, et al., 2008, Estimation of springback in double-curvature forming of plates: experimental evaluation and process modeling, Int. J. Mech. Sci., Vol. 50, pp. 704~718.
- [4] P. Xue, et al., 2001, An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming Part II: Unequal double-curvature forming, Int. J. Mech. Sci. Vol. 43, pp. 1915~1924.
- [5] K. C. Ho, et al., 2004, Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets, Int. J. Plast., Vol. 20, pp. 733~751.
- [6] K. Oliphant, et al., 1988, An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime, Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 18, pp. 1~10.
- [7] DEFORM-3D User's Manual, Ver.10.0.
- [8] J. R. Davis, 1993, Aluminum and aluminum Alloys, 3rd ed., The materials Information Society, USA, pp. 675~676.
- [9] J. X. Xie, et al., 1993, Theoretical Analysis on

- Fabrication Process of Pipe by Multi-Billet Extrusion, Journal of the JSPT, Vol. 34. pp. 823~829.
- [10] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, 1997, Hot Working Guide, 1st ed., The materials Information Society, USA, pp.101~103.
- [11] AISI H13 Hot Work Tool Steel, www.matweb.com.
- [12] ANSYS CFX Turbulence Model Manual, Ver.12.0.
- [13] J, W. Kwon, et al., 2005, A Study of Interface Heat Transfer Coefficient Between Die and Workpiece for Hot Forging, Trans. Mater. Process, Vol. 14, No. 5, pp. 460~465.