

격자형 금형의 냉각효과를 고려한 구형 LNG 탱크용 대형 알루미늄 후판의 열간성형해석

FE-Analysis of Hot Forming of Al Large Thick Plate for Spherical LNG Tank Considering Cooling Performance of Grid-Typed Die

이정민¹, 이인규², 김대순³, 권일근³, 이선봉⁴, 김병민^{5,✉}

Jung Min Lee¹, In Kyu Lee², Dae Soon Kim³, Il Keun Kwon³, Seon Bong Lee⁴, and Byung Min Kim^{5,✉}

¹ 한국생산기술연구원 동남권지역본부 (Dongnam Regional Division, Kitech)

² 부산대학교 하이브리드 소재솔루션협동과정 (National Core Research Center, Pusan National Univ.)

³ 현대중공업 산업기술소 (Industrial Technology Division, Hyundai Heavy Industries)

⁴ 계명대학교 기계자동차공학과 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)

⁵ 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3074

Manuscript received: 2011.9.2 / Accepted: 2012.3.19

A hot forming of large thick Al plate using a grid-type hybrid die is a process to make a shell plate for the production of a spherical LNG tank. This process is characterized by using a grid-typed die with an additional air cooling system for reducing the cooling time of the heated plate after hot forming. The process consists of the plate's feeding, heating, forming and cooling in detail and each of them is continuously performed along the rail. This paper was designed to propose the analytical and experimental methods for determining the convection and interfacial heat transfer coefficients required in hot forming analysis of Al plate. These values in the analysis are to reproduce numerically the cooling performance of grid-typed die and cooling device. Interfacial heat transfer was obtained from the heat transfer experiments for different pressures and inverse analysis method. To verify the efficiency of the coefficient values obtained from above methods, FE analysis and experiment of the hot spherical-forming process were conducted for a small-scaled model. The convection coefficient was also calculated from flow analysis of air released by cooling device within grid-typed die using ANSYS-CFX.

Key Words: LNG Tank (LNG 탱크), Hot Curvature Forming (열간곡면성형), Grid-typed Die (격자형금형), Heat Transfer Coefficient (열전달계수)

1. 서론

구형 LNG 탱크 외판용 후판의 곡면성형은 지금까지 주로 냉간다단성형방식에 의해 제조되어왔다. 그러나 최근 직경 50 m 이상의 대형 LNG 탱크의 수요가 증가함에 따라 대형 후판(폭 4 m, 길이 12 m, 두께 40~70 t)이 사용되면서 냉간방식의 생산

성 저하가 큰 문제점으로 대두되어 왔다. 현재 대형 후판 1 장을 냉간성형하기 위해서는 약 10 시간 이상이 소요되며 탱크 한 개당 약 100 장의 후판이 필요하다. 따라서 LNG 운반선 한 척당 5 개의 탱크가 소요됨을 감안할 때 운반선 건조에 있어 후판 곡면성형에만 막대한 시간이 소요된다.^{1,2}

최근 대형 후판의 곡면성형에 있어 냉간성형의

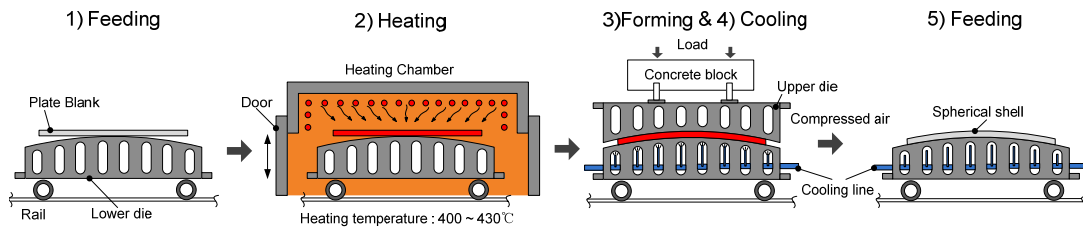


Fig. 1 Hot curvature-forming process of large thick Al plate using grid-typed die

문제점을 극복하기 위해서 격자형 금형을 이용한 열간성형공정이 개발되었다.^{1,2} Fig. 1 은 대형 후판의 열간성형공정의 개략도를 나타낸 것이다.¹ 공정은 크게 후판의 이송과 가열, 성형, 냉각 그리고 반출공정으로 이루어져 있으며 미리 설치된 레일을 따라 순차적으로 수행된다. 이러한 공정의 주요 특징은 Fig. 2 와 같이 격자형 금형 내부에 별도의 냉각장치가 설치 되어 있어 후판 성형과 냉각이 연속적으로 이루어지는데 있다. 열간성형온도는 약 430°C이며 강제냉각은 주로 압축공기를 통해 성형직후 상하금형이 닫힌 상태에서 후판온도가 약 200°C에 도달할 때까지 수행된다.^{1,2}

후판의 열간성형공정에서 가장 큰 문제점은 강제냉각과정에서 발생하는 후판의 열변형에 의한 곡면형상오차이다.³ 이것은 냉각시 후판의 불균일한 온도 분포와 소재의 열적, 기계적 특성에 의한 것으로 초기 금형의 곡면치수와 격자형상, 냉각라인 형상 및 위치 등 다양한 공정변수에 의존하고 있다.^{4,5} 따라서 후판의 열간성형에서 금형 및 공정설계를 효과적으로 수행하기 위해서는 CAE 를 통한 해석적인 접근방법이 필요하다.⁵

열간성형공정해석은 크게 후판의 변형해석과 냉각(온도변화)에 의한 열변형해석으로 나눌 수 있다. 특히 후판의 열변형량을 계산하기 위해서는

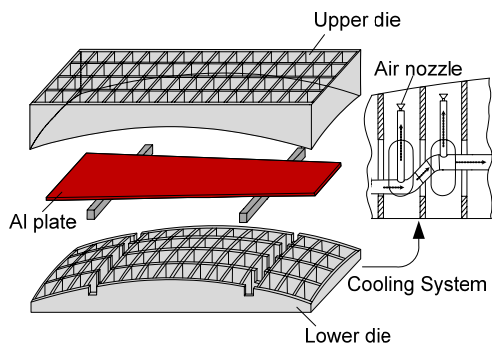


Fig. 2 Structures of grid-typed die and cooling system

압축공기의 강제냉각효과와 금형/후판 열전달에 의한 후판의 온도변화 이력을 정확히 해석적으로 구현하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 강제냉각효과와 금형/후판 열전달을 대표하는 값으로 각각 대류열전달계수(Convective heat transfer coefficient)⁶ 와 계면열전달계수(Interface heat transfer coefficient)를 채택하였다.

본 논문의 목적은 후판의 열간성형해석기법을 정립하기 위해 강제냉각해석에서 요구되는 대류열전달계수와 계면열전달계수를 도출하기 위한 해석 및 실험방법을 제안하기 위한 것이다. 계면열전달계수는 접촉압력에 따른 열전달 실험과 역해석 기법을 통해 도출되었으며 대류열전달계수는 강제냉각공정의 유체유동해석을 통해 도출되었다.^{7,8} 이후 도출된 각 값들의 유효성을 검증하기 위해 후판의 열간성형공정해석과 실험을 수행하여 서로의 결과들을 검증하였다.

2. 계면열전달계수 평가

2.1 실험 및 해석조건

일반적으로 열간성형시 소재와 금형간의 접촉면에서 발생하는 열전달은 압력, 온도, 윤활조건, 변형률 등에 영향을 받는다.⁹ 후판의 열간성형은 무윤활상태로 소재 변형률이 높지 않기 때문에 본 논문에서는 오직 소재와 금형간 접촉압력만을 변수로써 고려하였다. Fig. 3 은 열전달실험을 위한 금형과 소재의 형상 및 치수를 나타낸 것이다. 열전달계수는 역해석기법을 이용하여 도출되었다.⁷ 이것은 실험과 동일한 모델에 대해 계면열전달계수 변화에 따른 유한요소해석을 수행한 후 소재의 온도분포 결과를 실험결과와 서로 비교함으로써 최종 압력변화에 따른 계면열전달계수값을 예측하는 방법이다.⁹

전반적인 실험 및 해석조건은 Table 1 에 나타내었다. 소재는 Al5083 이며 금형은 열간 금형강인 STD61 을 사용하였다.¹¹ LNG 의 저장온도는 약 -

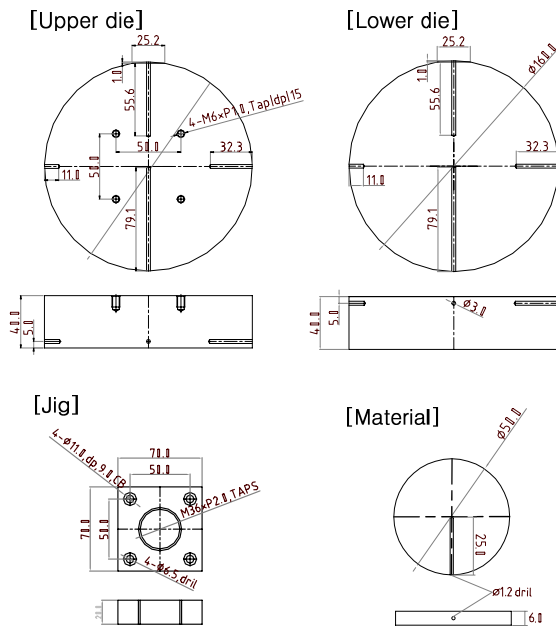


Fig. 3 Dimensions of upper and lower dies and material (Al 5083) for measuring interfacial heat transfer coefficients

Table 1 FE simulation and experiment conditions of interface heat transfer between material and die

Items	Die	Material
Heat conductivity (W/m °C)	14.4	117
Specific heat (J/kg °C)	460	900
Initial temp. (°C)	20	430
Types of material	STD61	Al5083
Pressure condition (MPa)	2, 4, 6, 8, 10	

163 °C이기 때문에 보통 극저온에서 기계적 특성이 우수한 Al 5083 이 주로 탱크 소재로 사용된다.¹⁰ Fig. 4 는 계면열전달 측정을 위한 장비를 나타낸 것이다. 실험은 430 °C까지 가열된 소재를 상하 금형사이에 안착시킨 후 접촉압력 2, 4, 6, 8, 10 MPa 에 대해 수행되었다. 이때 소재의 중심부 온도는 소재 내부에 홀을 가공하여 열전대(K-Type)를 삽입한 후 DATA-Logger 를 통해 측정되었다.

열전달 실험의 해석은 상용유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D 를 이용하였으며 해석모델은 Fig. 5 와 같이 축대칭 조건을 적용하였다. 해석에서 사용된 열전달계수값은 실험결과를 기준으로 3000 ~ 10000 W/m²°C 범위내에서 설정하였다.

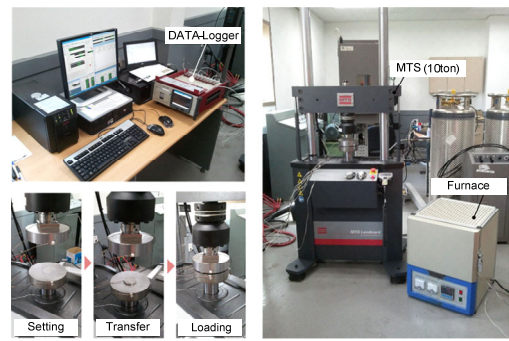


Fig. 4 Experiment equipments for measuring interfacial heat transfer coefficients

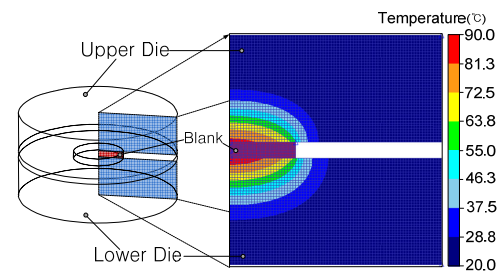


Fig. 5 FE analysis model for predicting interfacial heat transfer coefficients

2.2 결과

Fig. 6 은 계면열전달 실험결과로서 접촉압력에 따른 소재의 온도변화를 나타낸 것이다. 결과는 소재와 금형간의 접촉압력이 증가할수록 소재의 냉각속도는 증가하는 경향을 보였다. Fig. 7 은 실험

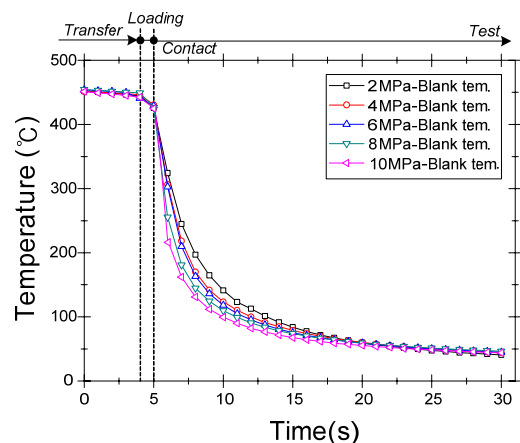


Fig. 6 Temperature distributions of the material according to different contact-pressure conditions

과 해석에서 각각 접촉압력과 계면열전달계수 변화에 따른 소재의 온도변화를 서로 비교한 것이다. 결과는 2 MPa(가압력)-3500 W/m²°C(계면열전달계수), 4 MPa-5000 W/m²°C, 6 MPa-6500 W/m²°C, 8 MPa-8000 W/m²°C, 10 MPa-8500 W/m²°C일 때 실험과 해석 결과가 가장 유사함을 보였다. Fig. 8 은 앞선 실험과 해석을 통해 도출된 접촉압력에 따른 계면열전달계수 변화를 나타낸 것이다. 접촉압력 2~8 MPa까지는 1500 W/m²°C 간격으로 일정하게 증가하는 경향을 보였으나 8 MPa 이후부터는 압력이 증가하더라도 계면열전달계수의 변화는 크게 나타나지 않았다. 이러한 계면열전달계수값은 이후 후판의 열간 성형해석에 적용되었다.

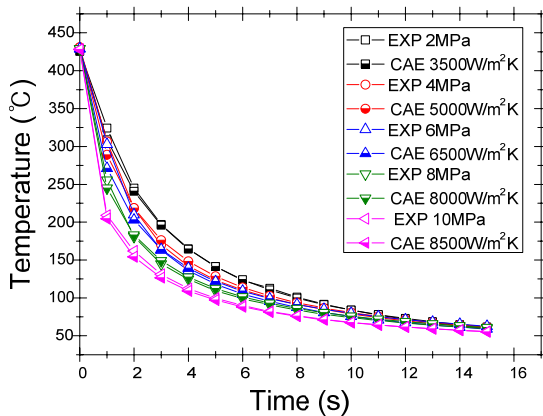


Fig. 7 Comparison of temperature distributions of the materials obtained from the results of experiment and FE analysis

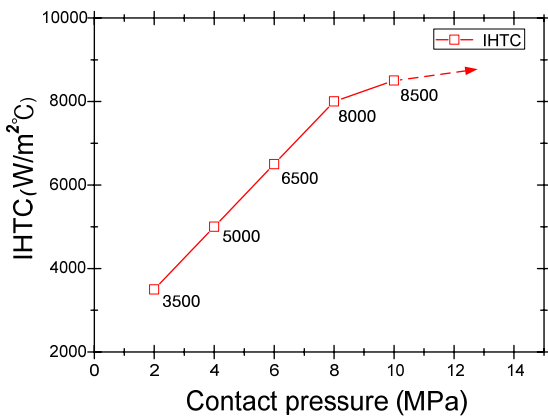


Fig. 8 Interface heat transfer coefficients according to the contact-pressure extracted from inverse analysis

3. 대류열전달계수 평가

3.1 해석모델 및 조건

일반적으로 Fig. 2 와 같이 냉각노즐에서 분사된 압축공기와 후판소재 사이의 열전달은 대부분 대류에 의해 발생한다. 또한 이러한 공기의 대류특성은 금형 형상뿐만 아니라 다양한 외부환경 변수에 의존하기 때문에 하나의 실험을 통해 정의하기가 매우 어렵다.^{4,6} 따라서 본 논문에서는 유체유동 해석 프로그램인 ANSYS-CFX⁸ 를 이용하여 다양한 변수(금형형상, 소재온도, 노즐속도, 외부온도 등)를 고려한 격자금형내 압축공기의 대류열전달 특성을 평가하였다. Fig. 9 는 해석에 적용된 격자금형과 후판의 치수를 나타낸 것이다. 후판의 크기는 250×250×6t(mm)이며 하금형의 곡면 치수는 R1500 이며 격자는 정사각형 형상의 90×90 mm, 격자살 두께는 10 mm로 설정하였다. 또한 냉각노즐과 소재간의 거리는 25 mm가 되도록 설계하였다.

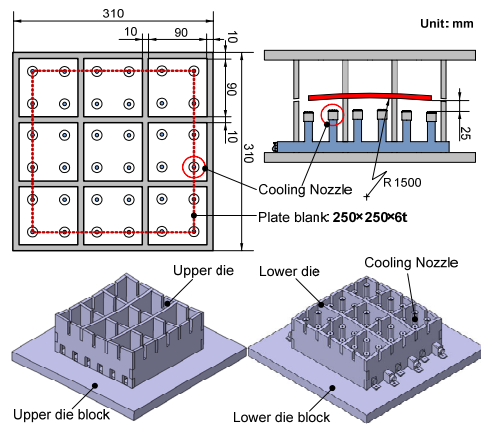


Fig. 9 Dimensions of grid-typed die and cooling system

Fig. 10 은 유동해석을 위한 해석모델을 나타낸 것으로 격자금형의 대칭성을 고려하여 1/4 단면을 취하였다. 본 해석에서는 성형후 후판이 완전한 R1500 을 이루며 상하금형과 이상적으로 접촉하고 또한 성형시간이 매우 짧기 때문에 성형후 후판의 온도변화는 없다고 가정하였다. 따라서 유동해석 초기 후판의 온도는 430°C로 적용하였다. Table 2 는 해석에 사용된 공기와 금형, 후판(Al5083)의 열적 물성치를 나타낸 것이다.^{4,10,11} Table 3 은 압축공기의 분사조건을 나타낸 것이다. 냉각 장치는 하부금형에만 설치되어 있으며, 노즐 오리피스(orifice) 직경은 3 mm이며 노즐속도는 50 m/s 로 하였다.

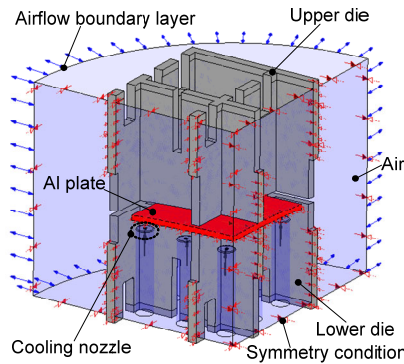


Fig. 10 FE model for CFX analysis of air flow

Table 2 Physical properties of air, die and Al5083

Items	Air	Die	Al
Specific heat (J/Kg °C)	1004.4	460	900
Heat conductivity (W/m °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): 1.831×10^{-5}			

Table 3 Jet condition of compressed air

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

3.2 결과

Fig. 11 은 유동해석결과로써 격자금형내 압축공기의 유동양상과 유속분포를 나타낸 것이다. 냉각노즐에서 분사된 압축공기는 Al 후판 하단부를 집중적으로 냉각하며 이후 후판과 하금형 사이의 틈새를 통해 상금형으로 이동하는 양상을 보였다. 또한 압축공기가 후판과 접촉하는 순간 유속이 초기 50 m/s 에서 10 m/s 이하로 감소되었으며 전반적으로 하금형에서 유체유동이 활발하게 진행되었다.

Fig. 12 는 냉각완료시점(200 sec)에서 Al 후판의 온도와 대류열전달계수분포를 나타낸 것이다. Al 후판의 온도는 최대 105°C에서 최소 97°C로 금형과 접촉하는 부위에서 온도 감소가 두드러지게 발생하였다. 이때 압축공기의 대류열전달계수는 최대 130 W/m²°C에서 최소 20 W/m²°C로 평가되었다.

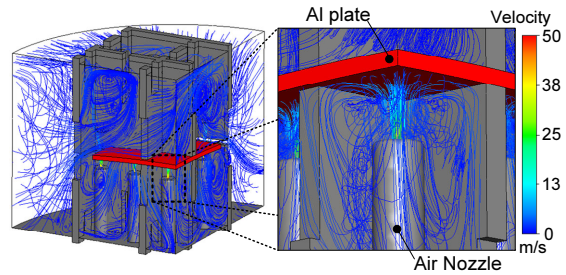


Fig. 11 Velocity distributions of air released by cooling nozzle in CFX analysis

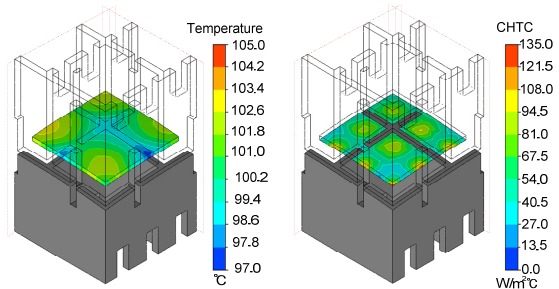


Fig. 12 Temperature and CHTC distributions of Al plate after 200 sec in CFX analysis

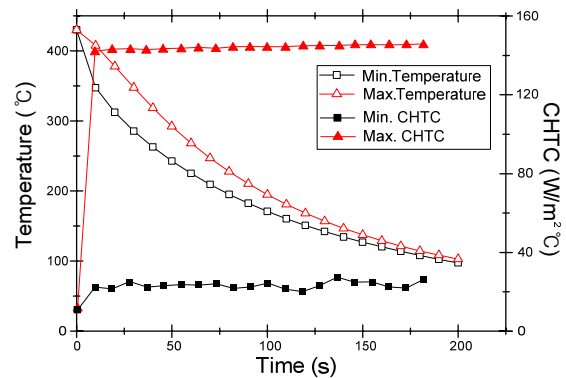


Fig. 13 Variations of temperatures and convection heat transfer coefficient of Al plate with cooling times in CFX analysis

Fig. 13 은 냉각시간에 따른 후판의 온도와 대류열전달계수 변화(최대/최소값)를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 대류열전달계수는 냉각시간 동안 후판의 온도변화와 관계없이 일정하게 유지되었다. 이것은 대류열전달계수값이 압축공기의 냉각성능을 대표하는 값으로 사용될 수 있다는 것으로 의미한다.

4. 후판 열간성형해석 및 실험

4.1 열간성형 해석조건 및 결과

Fig. 14 는 후판의 변형해석과 냉각에 의한 열변형해석 모델을 나타낸 것이다. 후판의 열변형해석은 상하금형이 닫힌 상태에서 냉각노즐의 압축공기에 의해 강제냉각되는 1 차 냉각과 상금형을 제거한 후 자연냉각되는 2 차 냉각으로 구분된다.⁵ 후판 변형해석과 1 차, 2 차 냉각해석은 동일한 격자금형 모델에 대해 연속적으로 이루어진다. 1 차 냉각해석에서는 앞선 유체유동해석에서 평가된 대류열전달계수 분포(h_f)를 적용하였으며 2 차 냉각해석에서는 자연대류열전달계수(h_n)¹²을 적용하였다.

해석 모델(Fig. 14)은 Fig. 9 와 동일하며 앞선 유동해석과 같이 1/4 단면을 취하였다. 전반적인 해석조건은 Table 4 에 나타내었다. 금형과 소재사이의 계면열전달계수값은 앞선 열전달실험을 통해 얻어진 값(Fig. 8)을 적용하였다. 해석에서 금형은 강체, 후판은 탄소성체로 정의하였으며 후판의 거동

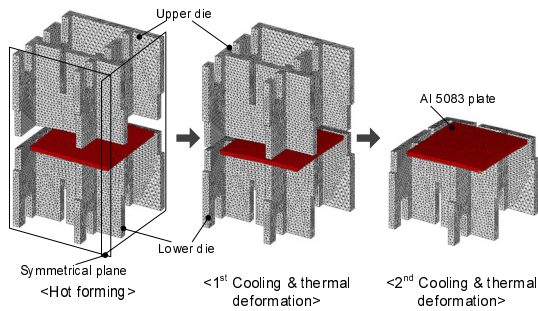


Fig. 14 FE models of forming and thermal deformation analysis of Al plate

Table 4 FE simulation conditions of hot forming and thermal deformation of Al plate

Items	Value
Material of Al plate	Al 5083
Material of upper and lower die	STD31
Initial temp. of plate and die (°C)	430 and 20
Upper die speed (mm/s)	100
Friction factor (m)	0.6
Poisson's ratio	0.33
Interface-HTC h_c (W/m ² °C)	4000
h_n (W/m ² °C)	20
h_f (W/m ² °C) by compressed air	20~130

Table 5 E and CTE of Al 5083 for different temperature

Temp.	E(GPa)	Temp.	CTE(μ /m°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}

은 고온유동응력곡선과 탄성계수(E), 열팽창계수(CTE)로 정의하였다.⁵ Table 5 에 온도에 따른 Al5083 의 E 와 CTE 를 나타내었다. 해석은 DEFORM-3D 를 이용하였다.

Fig. 15 는 후판 변형해석결과로 하중-스트로크 곡선과 후판의 온도변화를 나타낸 것이다. 총 성형시간은 0.15 sec (Stroke 15 mm)이며 상금형을 정확히 초기 소재두께(6t)까지 하강시켰다. 후판은 금형과 접촉한 부위에서 국부적으로 일부 약간의 온도 변화가 관찰되었지만 대부분 영역에서 초기 온도를 유지하였다. 따라서 앞선 유동해석에서 초기 금형과 후판의 온도의 사용은 해석결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

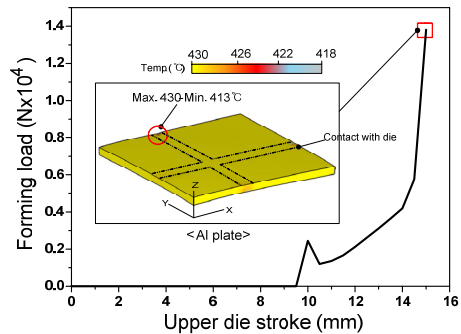


Fig. 15 Forming load – stroke curve and temperature distributions of Al plate after forming analysis

Fig. 16 은 1 차 냉각해석과 유동해석에서 냉각 시간에 따른 후판의 온도변화를 비교한 것이다. 두 해석 모두 온도가 감소될수록(냉각시간 증가) 후판의 최대/최소 온도차(T_d)는 감소되었으며 냉각 완료시점에서 1 차 냉각 해석은 8°C, 유동해석은 5°C 차이를 보였다. 그러나 전반적으로 두 해석은 서로 매우 유사한 온도감소경향과 온도값을 나타내고 있다. 따라서 유동해석을 통해 얻어진 대류 열전달계수(h_f)값을 압축공기의 냉각성능을 대표하는 값으로 사용하는 것이 하는 것이 타당하다고

판단된다. 냉각완료시점에서 후판의 온도는 유동 해석이 1 차 냉각해석보다 약 5℃ 낮게 나타났다.

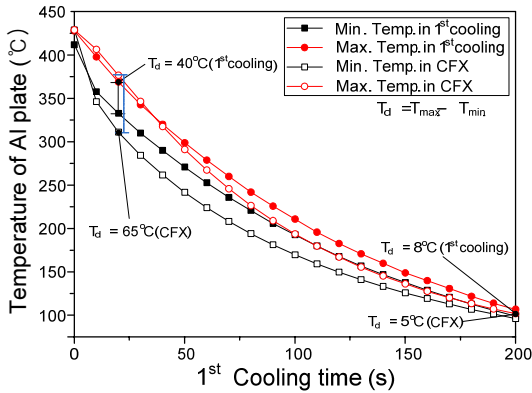


Fig. 16 Max./min. temperature of Al plate with cooling time in 1st cooling and CFX analysis

이는 1 차 냉각해석시 후판의 열변형과 열수축으로 인해 유동해석에 비해 금형과 접촉면적이 상대적으로 감소되기 때문이다.

Fig. 17 은 2 차 냉각해석 결과로써 냉각시간에 따른 후판의 최대/최소 온도변화를 나타낸 것이다. 총 냉각시간은 800 sec 이며 냉각 종료시점에서 후판의 최대/최소 온도차는 0.1℃로 거의 발생하지 않았다. 이는 상금형에 의한 가압이 없어 Al 후판의 중심부를 제외하고는 금형과 소재간의 접촉이 없기 때문이다.

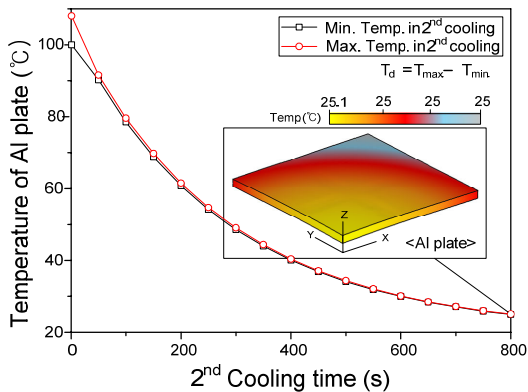


Fig. 17 Max./min. temperature of Al plate with cooling time in 2nd cooling

4.2 열간성형 실험조건 및 결과

앞선 해석의 유효성을 검증하기 위해 격자금

형을 이용한 후판의 열간성형실험을 수행하였다. Fig. 18 은 실험을 위한 장비 구성과 격자금형 및 냉각장치를 나타낸 것이다. 전반적인 실험조건과 금형형상은 해석(Fig. 9)과 동일하며 실험은 분위기 온도가 20℃일 때 실내에서 수행되었다. 냉각 노즐은 유속계를 이용하여 압축공기 분사속도가 50 m/s 가 되도록 설정하였다. 후판은 가열로에서 470℃까지 가열시킨 후 금형에 설치된 별도의 지그(Jig, Fig. 18)를 이용하여 하금형 중심에 위치시켰다. 이후 후판의 온도가 약 430℃ 가 되는 시점에서 성형을 수행하였으며 1 차 냉각과 2 차 냉각을 순차적으로 진행하였다. 열간성형공정동안 후판의 온도변화를 관찰하기 위해 후판 모서리(Fig. 18(a))에 홀을 가공하여 열전대를 삽입하였다.

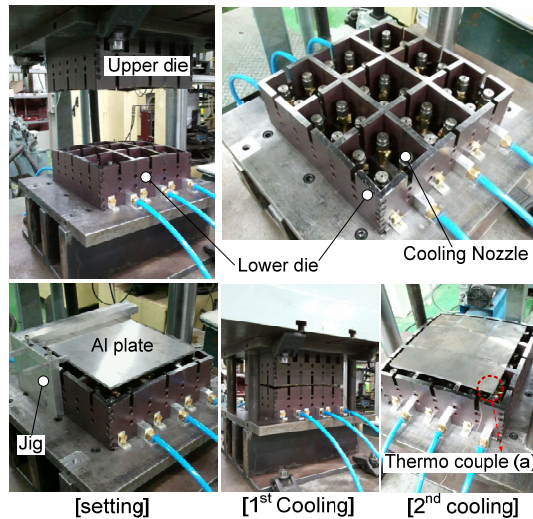


Fig. 18 Experimental set-up of hot curvature-forming of Al plate

Fig. 19 는 실험과 열변형 해석에서 냉각시간에 따른 후판 온도(Fig. 18(a)지점)변화를 비교한 것이다. 1 차 냉각완료시(200 sec) 해석과 실험의 온도차이는 약 17℃이며 2 차 냉각완료시(1000 sec) 약 7.9℃를 나타내었다. 전반적으로 해석과 실험은 매우 유사한 온도 감소경향과 온도값을 나타내었다. 따라서 이러한 결과는 격자금형내 압축공기의 유동해석을 통해 대류열전달계수를 예측하는 방법이 타당하며 후판의 열간성형해석을 위해 본 연구에서 제안된 일련의 절차 및 방법이 매우 유효하다는 것을 의미한다.

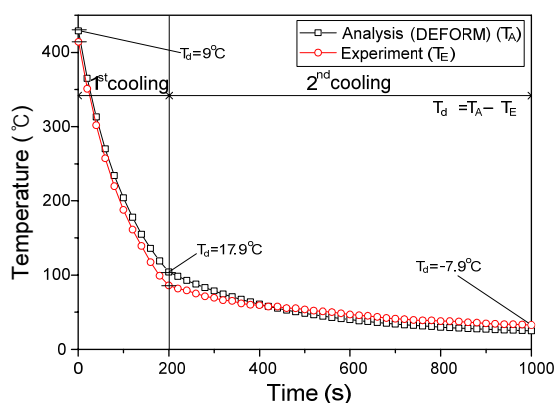


Fig. 19 Temperature of Al plate's edge (Fig. 18(a)) during 1st and 2nd cooling processes

5. 결론

본 연구에서는 격자금형을 이용한 후판의 열간 성형해석시 후판의 냉각효과를 구현하기 위해 대류열전달계수와 계면열전달수계수값을 도입하였다. 대류열전달계수는 격자금형내 압축공기의 유동해석을 통해 도출되었으며 계면열전달계수는 열전달 실험과 역해석기법을 이용하여 도출되었다. 각각 계수값은 후판의 열간성형해석에 적용되었고 이러한 해석과정의 유효성은 실험을 통해 검증되었다. 그 결론은 다음과 같다.

(1) 열전달시험과 역해석기법을 통해 도출된 계면열전달계수는 접촉압력 2 MPa 에서 8 MPa 까지 1500 W/m²°C씩 선형적으로 일정하게 증가하였으나 8 MPa 이후에는 증가량이 완만하게 감소하여 거의 일정값을 가진다.

(2) 해석으로부터 얻어진 냉각시간에 따른 후판의 온도변화는 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 따라서 격자금형내 냉각노즐에서 분사된 압축공기 냉각성능은 유동해석으로부터 도출된 후판 표면에 발생하는 대류열전달계수값으로 대표될 수 있다. 또한 본 연구에서 제안된 격자금형을 이용한 후판의 열간성형해석의 일련의 절차는 매우 유효하며 향후 공정변수 평가 및 격자설계, 금형곡면 설계를 위한 해석방법으로 적절하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술

부의 해외우수연구기관유치사업 및 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Anttila, J., Gustafsson, J., Heinakari, M., Linja, J., and Vaihinien, M., "Spherical LNG-tank and a production method for such a tank," US Patent, No. 5529239, 1996.
2. Baysinger, F. R., "Liquefied natural gas tank construction," US Patent, No. 4182235, 1979.
3. Kim, H. Y., Kim, C. Y., Choo, W. Y., and Chang, R. W., "Analysis of Stress and Distortion that Develop during Accelerated Cooling of Plate," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 952-958, 1988.
4. Oliphant, K., Webb, B. W., and McQuay, M. Q., "An experimental comparison of liquid jet array and spray impingement cooling in the non-boiling regime," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 18, pp. 1-10, 1998.
5. Lee, I. K., Lee, J. M., Son, Y. K., Lee, C. J., and Kim, B. M., "Experimental and Fe Analyses of Hot Curvature-Forming for Aluminum Thick Plate Using Grid-Typed Hybrid Die," Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No. 4, pp. 316-323, 2011.
6. Hwang, S. J., Ko, D. H., Kim, D. H., and Kim, B. M., "Temperature Prediction of Al6061 Tube in Cryogenic Heat Treatment by CFD Analysis and Experimental Verification," J. of the KSPE, Vol. 28, No. 10, pp. 1210-1216, 2011.
7. Jeong, D. J., "Influence of the Dimensional Accuracy by Friction Shear Factor of Lubricants and Methods in Worm Forged Products," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Design Engineering, Pusan National University, 2001.
8. ANSYS, "ANSYS CFX Turbulence Model Manual, Ver. 12.0," 2010.
9. Kwon, J. W., Lee, J. H., Lee, Y. S., Kwon, Y. N., and Bae, W. B., "A Study of Interface Heat Transfer Coefficient Between Die and Workpiece for Hot Forging," Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No. 5, pp. 460-465, 2005.
10. Davis, J. R., "Aluminum and aluminum alloys, 3rd ed.," The Materials Information Society, pp. 675-676,

- 1993.
11. MatWeb, "AISI H13 Hot Work Tool Steel," www.matweb.com
 12. Xie, J. X., Murakami, T., Takahashi, H., and Ikeda, K., "Theoretical Analysis on Fabrication Process of Pipe by Multi-Billet Extrusion," *Journal of the JSPT*, Vol. 34, pp. 823-829, 1993.