

비선형 열전달 계수를 사용한 알루미늄 6082 빌렛의 열간 압축 공정 해석

전효원¹ · 서창희[#] · 권태하¹ · 박춘달¹ · 전진호² · 최현열² · 강경필³

Analysis of Hot Compression Process of Aluminum 6082 Billet using Nonlinear Heat Transfer Coefficient

H. W. Jeon, C. H. Suh, T. H. Kwon, C. D. Park, J. H. Jeon, H. Y. Choi, G. P. Kang

(Received August 20, 2018 / Revised January 15, 2019 / Accepted January 16, 2019)

Abstract

In order to reduce the weight of automobile parts, automobile parts using aluminum alloy are being developed. Aluminum alloy for automobile parts is mainly made of Al6xxx (Al-Mg-Si) type alloy, which is excellent in hot forming property, and it can increase mechanical properties by the use of heat treatment. In this study, hot forming was performed using Al6082. Before the hot forming, the forming analysis was performed using the DEFORM-3D finite element analysis program in this case. For the forming analysis, the heat transfer coefficient was derived from the experiment, and the forming analysis was performed by applying it. At the forging analysis, the temperature of Al6082 material was set to 813K and that of the mold was set to room temperature. After the forging analysis, the experiment was performed, and the forging analysis and the experimental results were compared.

Key Words : Automobile parts, Al 6082, Hot forming, Heat transfer coefficient, DEFORM-3D

1. 서 론

내연기관 자동차의 연비 향상 및 차세대자동차 개발을 위하여 자동차 부품의 경량 소재 적용이 점차 증가하는 추세이다. 자동차 부품의 경량화를 위하여 알루미늄 합금 및 마그네슘 합금, 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP) 등 다양한 경량 소재가 자동차 부품에 적용되고 있다. 특히, 알루미늄 합금은 다른 경량 소재에 비하여 내식성 및 성형성이 뛰어나기 때문에 다양한 자동차 부품에 적용되고 있다. 자동차 부품에 적용되는 알루미늄 합금은 주조 및 소성 가공 등과 같이 다양한 공법으로 제

작되며, 내구성 및 강도 등의 기계적 특성을 요구하는 부품의 경우 소성 가공으로 제작된다. 소성 가공 시 고온에서 소재 유동성이 좋고, 열처리(T6)를 통하여 기계적 성질이 향상되는 Al6xxx계열 소재가 널리 적용되고 있다.

Al6xxx계열 중 Al6061 소재를 이용한 열간 성형성에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다. 변형을 속도 및 온도에 따른 압축 실험을 통하여 응력-변형률 곡선을 도출하였고, 이에 따른 미세조직을 분석하는 연구가 진행되었다[1]. E. Gokcil 외 2명은 Al6082 소재를 이용하여 자동차 부품을 열간 단조 후 열처리를 통하여 소재 물성 및 미세조직을 제어하는 연구를 수행하였다[2]. 이와 같이 Al6xxx를 열간 성형을 통하여 자동차 부품에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되어왔다. 특히, 유한요소 해석

1. 대구기계부품연구원

2. ㈜화신정공

3. 솔루션랩

Corresponding Author : Daegu Mechatronics & Materials Institute,
E-mail : suhch@dmi.re.kr, ORCID ID : 0000-0002-0381-5286

을 이용하여 실제 성형을 실시하기 전 형상 및 성형 하중을 예측하는 연구가 진행되었다[3-5]. 앞의 Al6xxx계열 소재를 이용한 연구는 열간 성형을 실시하기 전 유한요소 해석을 통하여 형상 및 하중을 예측하였다. 형상 및 하중을 예측할 때 온도에 따른 유동곡선을 실험을 통하여 도출하였고, 열전달 계수는 온도 또는 압력에 대하여 고려하지 않고 일정한 값을 적용하여 수행하였다. 실제 성형 공정에서는 압력 및 온도에 따라 접촉 열전달 계수와 대류 열전달 계수가 달라지기 때문에 성형해석과 실제 성형품에서 형상 및 하중의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 파악하기 위하여 C. H. Suh 외 5명은 합금강 판재 소재를 이용하여 온도에 따른 대류 열전달 계수를 도출하기 위하여 직접 실험을 실시하여 비선형적 대류 열전달 계수를 도출하였다[6,7]. 도출된 대류 열전달 계수와 일정한 열전달 계수를 이용한 열처리 해석을 수행하였으며, 두 해석 결과 비교하여 열전달 계수에 따른 열변형량 차이를 확인하였다. C. C. Chang은 원통형 탄소강 소재를 이용하여 단축 압축실험을 실시하여 얻어진 데이터와 유한요소 해석을 이용하여 탄소강의 열간 성형 시 적용할 수 있는 열전달 계수를 도출하였다[8]. 그 외에도 시간에 따른 열전달 계수를 도출하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되었다[9,10]. 앞선 연구에서는 탄소강을 이용하여 열간 성형 시 열전달 계수를 구하였고, 시간에 따른 열전달 계수를 도출하였다. 시간에 따른 열전달 계수를 적용하여 열간 단조를 전산모사를 수행하였을 경우 성형 압력을 고려하지 않았기 때문에 성형 예상 하중 및 형상에서 정확하지 않은 해석 결과가 도출될 것으로 보여진다.

본 연구에서는 Al6082를 이용하여 열간 성형 시 형상 및 온도 분포에 영향을 미치는 열전달 계수를 도출하였으며, 이를 이용하여 열간 성형 해석을 수행하였다. 또한, 실제 열간 성형을 통하여 열전달 계수가 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 열전달 계수

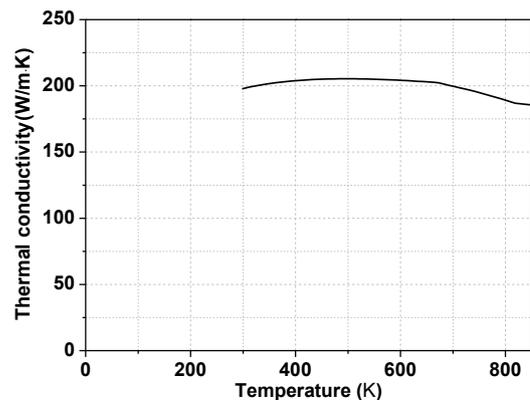
2.1 열전도도 및 열용량 계수

열전달 계수를 도출하기 위해서는 열전도도와 열용량이 먼저 도출되어야 한다. 열전도도와 열용량은 JMatPro를 이용하여 도출하고자 하였다. JMatPro에서 열전도도와 열용량을 도출하기 위하여 Al6082 성분

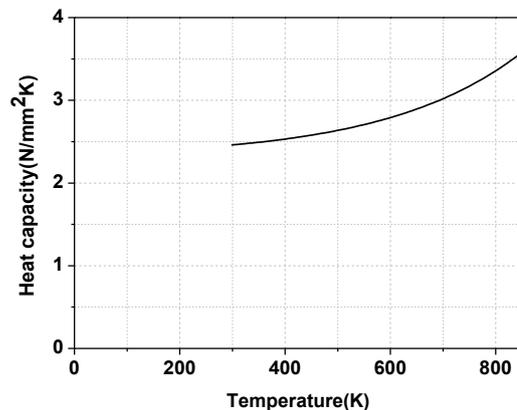
분석을 수행하여 Table 1의 화학성분을 도출하였다. 성분 분석을 통하여 도출된 Al6082의 화학성분을 JMatPro에 적용하여 열전도도 및 열용량을 도출하였다. 도출된 열전도도와 열용량은 Fig. 1에 제시된 바와 같다. 열전도도는 Fig. 1(a)에서 제시된 바와 같으며, 온도에 따라 열전도도가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 열전도도는 약 673K 이하의 온도까지 유사한 값을 가지나, 673K 이후에는 서서히 감소하는 것을 확인하였다. 열용량은 Fig. 1(b)에서 제시된 바와 같으며, 온도에 따라 열용량이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 열용량의 경우 온도가 상승함에 따라 열용량도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Chemical composition of Al6082(wt%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr
Bal.	0.91	0.14	0.29	0.38	.077	0.02	0.18



(a)



(b)

Fig. 1 Thermal properties data of Al6082: (a) Thermal conductivity, (b) Heat capacity

2.2 대류 열전달 계수

대류 열전달 계수를 도출하기 위하여 열전달 실험과 해석을 진행하였다. 열전달 실험은 외경 62mm 길이 120mm의 Al6082 소재를 813K까지 가열 후 상온에서 냉각하는 실험을 수행하였다. 상온에서 냉각 시 소재의 부위별 냉각속도를 측정하기 위하여 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 총 4부위(S10, S31, U10, U31)에 드릴가공을 실시한 후 K-type 열전대를 연결하여 온도를 측정하였다. 가열 및 온도 데이터 측정은 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 실험용 가열로와 데이터 수집 장치(GP10 data acquisition)를 이용하였다. 실험 방법은 813K로 가열된 실험용 가열로에 Al6082 소재를 투입한 후 1시간 동안 유지하여, 가열로 내부의 분위기 온도와 소재 온도를 동일하게 하도록 하였다. 1시간 동안 가열된 Al6082 소재를 가열로에서 취출한 후 상온에서 냉각하도록 하였다. 이때 온도데이터 수집 장치를 이용하여 1초에 1개의 온도 데이터가 저장이 되도록 하였다.

앞의 실험으로 얻어진 Al6082 소재의 냉각 데이터를 이용하여 대류 열전달 계수를 도출하고자 하였다. 대류 열전달 계수를 도출하는 방법은 B. Xiao 외 5명의 논문을 참고하였다[11]. B.Xiao 외 5명은 실험을 통하여 얻어진 소재의 냉각 데이터를 반복 해석을 통하여 오차를 줄이는 방법으로 해석을 진행하였으며, 본 논문에서도 동일한 방법을 이용하였다. 열전달 반복 해석을 위하여 DEFORM-2D를 이용하였으며, 초기 대류 열전달 계수는 온도에 따라 동일한 값인 $0.02\text{N/s/mm}^{\circ}\text{C}$ 으로 설정하여 해석을 진행하였다. 열전달 반복 해석 시 사용된 소재 형태는 Fig. 2에서 제시된 형상을 이용하였으며, 축대칭 형상을 가지기 때문에 축대칭 모델을 이용하여 열전달 반복 해석을 수행하였다. 반복 해석에 따른 Al6082 소재의 대류 열전달 계수는 Fig. 4에서 제시된 바와 같이 도출되었다. 반복 계산을 통하여 도출된 대류 열전달 계수를 검증하기 위하여 실제 냉각 실험을 통하여 얻어진 온도 결과값과 열전달 해석을 통하여 얻어진 온도 결과값의 각 부위(S10, S31, U10, U31)에 따른 온도비교를 수행하였다. 실제 냉각 실험과 해석 결과 온도 비교는 Fig. 5에서 제시된 바와 같으며, 냉각 시간에 따른 온도의 차이는 거의 없는 것을 확인하였다.

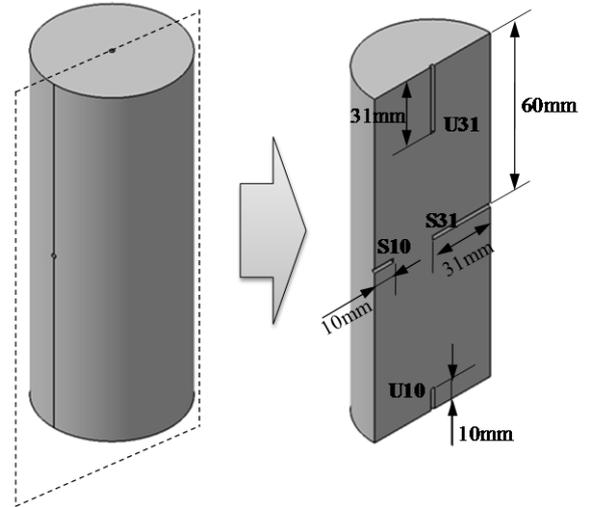


Fig. 2 Temperature measurement position of specimen

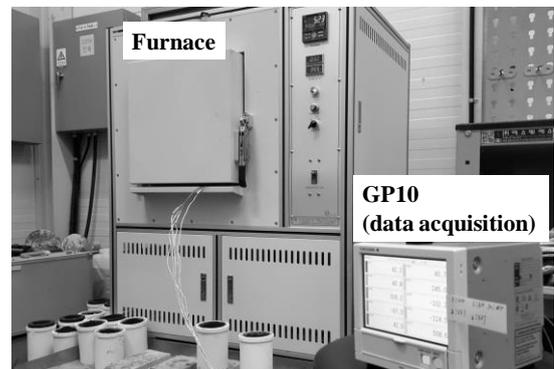


Fig. 3 Heating furnace and data acquisition device for temperature measurement

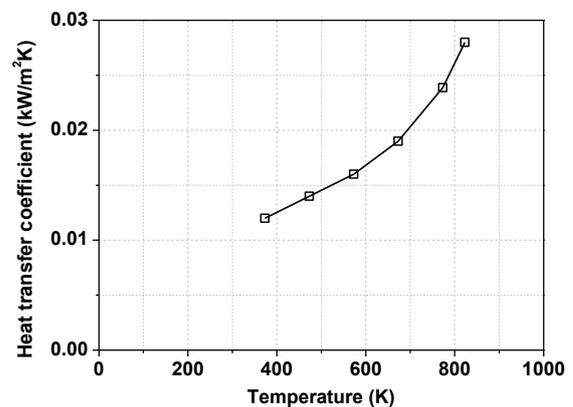
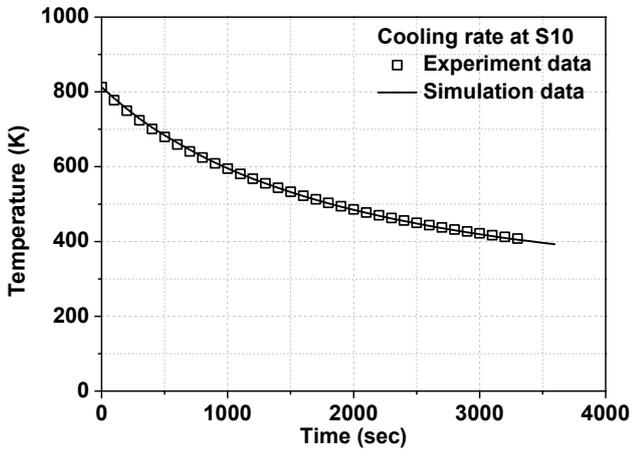
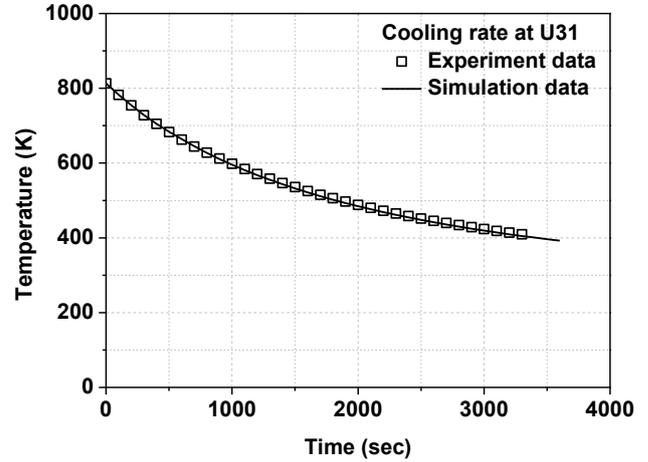


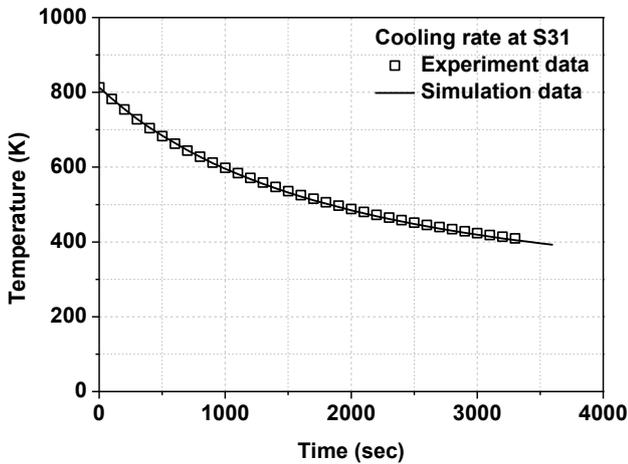
Fig. 4 Convective heat transfer coefficient of Al6082



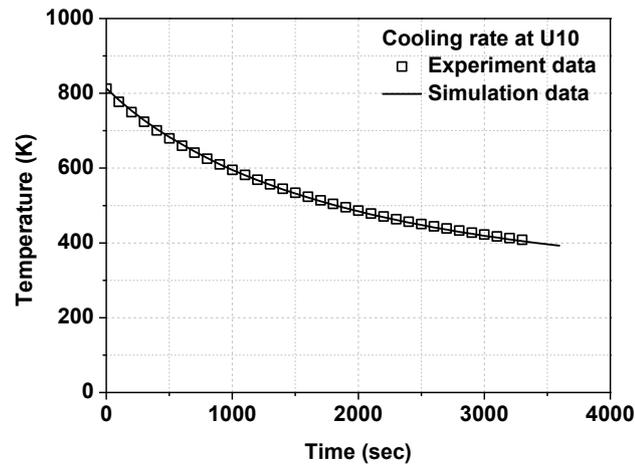
(a)



(d)



(b)



(c)

Fig. 5 Comparison of cooling rate between experiment and FE-analysis: (a) S10, (b) S31, (c) U10, (d) U31

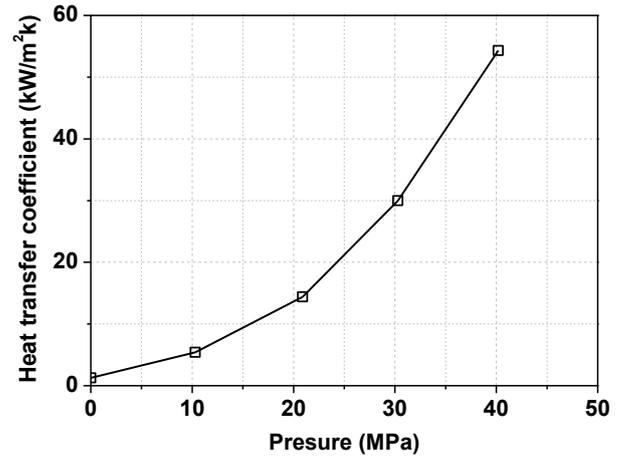


Fig. 6 Contact heat transfer coefficient of Al6061[12]

2.3 접촉 열전달 계수

금형을 이용한 열간 성형 시 소재와 금형의 접촉에 의해서 열전달이 발생하며, 접촉 열전달은 접촉 압력에 의하여 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 접촉 열전달 계수는 압력의 함수로 나타나게 된다. 접촉 열전달 계수를 실험적으로 구하기 위해서는 열전대를 용접 후 실시간 온도를 측정하여야 한다. 하지만, 알루미늄 합금에 열전대를 용접 후 열간 성형을 수행 시 용접부 손실이 발생하여 실시간 데이터를 얻기에 어려움이 있어서 본 연구에서는 참고 문헌에서 얻어진 접촉 열전달 계수를 사용하였다.

압력에 따른 열전달 계수는 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 V. K. Jain이 423K의 Al6061 소재를 573k의 금형 사이에 위치시켜 평편한 금형으로 소재를 압축하여 소재 및 금형 온도 변화를 측정 후 압력에 따른 열전달 계수를 도출하였다[12]. 본 연구의 접촉 열전달 계수는 V. K. Jain이 도출한 Al6061 소재의 비선형 접촉 열전달 계수를 적용하였다. Al6061과 Al6082 소재는 Al-Mg-Si 계열의 알루미늄 합금으로 Table 2에서 제시된 바와 같이 성분이 매우 유사한 것을 확인하였다. V. K. Jain이 도출한 비선형 접촉 열전달 계수의 온도 범위는 423-573K이며, 본 논문에서 소재를 10초 냉각 후 상온 금형에 안착시켜 성형을 실시하기 직전의 온도는 Fig. 7에서 제시된 바와 같이 381-484K로 V. K. Jain이 실험을 수행한 온도 영역과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 이유로 V. K. Jain이 도출한 Al6061 소재의 접촉 열전달 계수를 본 연구에 사용하고자 하였다.

Table 2 Comparison of Al6082 and Al6061 alloy components

Al6082							
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr
Bal.	0.91	0.14	0.29	0.38	.077	0.02	0.18
Al6061							
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr
Bal.	0.4~0.8	0.7↓	0.04~0.35	0.15↓	0.8~1.2	-	0.04~0.35

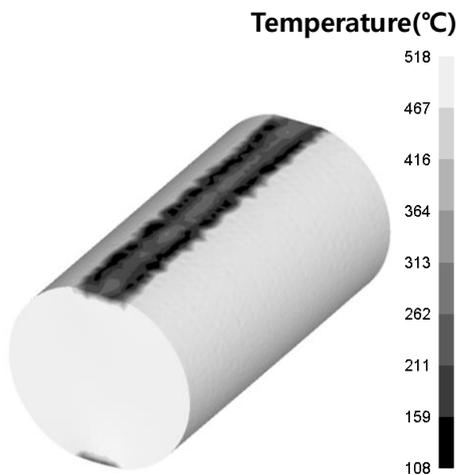


Fig. 7 Temperature distribution due to contact between die and Al6082 billet

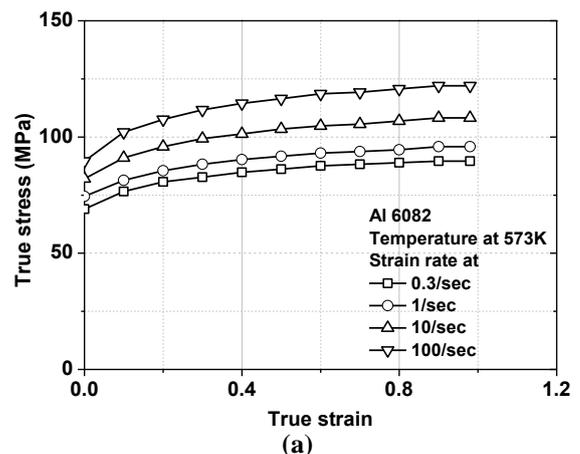
3. 열간 압축 해석

3.1 해석 조건

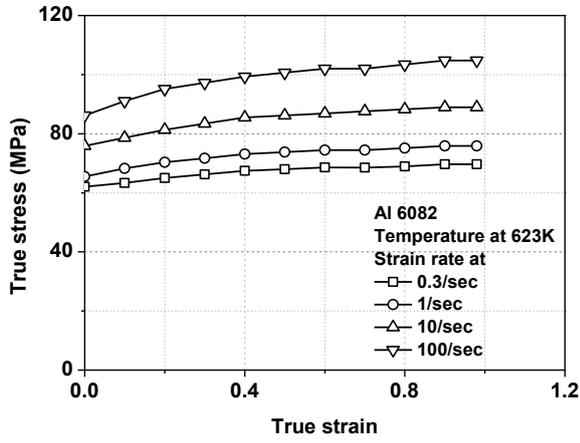
앞의 해석과 실험, 논문을 통하여 얻어진 열전도도 및 열용량, 대류 열전달 계수, 접촉 열전달 계수를 이용하여 열간 압축 성형 해석을 수행하였다. 열간 압축 성형 해석을 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하였다. 대류 및 접촉 열전달 계수에 따른 성형성의 차이를 분석하기 위하여 Table 3에서 제시된 바와 같이 2가지 해석을 수행하였다. Case-1은 J. H. Kang와 2명이 제시한 일정한 값의 대류 및 접촉 열전달 계수를 적용하였으며, Case-2는 앞의 실험을 통하여 얻어진 비선형 대류 및 접촉 열전달 계수를 적용하였다[13]. 그 외 고온 유동곡선은 Fig. 8에서 제시된 바와 같이 DEFORM-3D에서 제공하는 것을 사용하였으며, 마찰 계수는 쿨롱 마찰계수 0.2을 적용하여 열간 압축 해석을 수행하였다. 해석 공정은 Fig. 9에서 제시된 바와 같이 813K로 가열된 외경 62mm, 길이 120mm의 소재를 이송을 고려하여 공기 중에서 10초간 냉각 해석을 수행하였다. 공기 중에서 냉각된 소재를 상형과 하형이 모두 평편한 금형 사이에 안착하여 50%의 압축률을 부과하는 성형을 수행하였다.

Table 3 Cases of hot forming analysis by heat transfer coefficient[12]

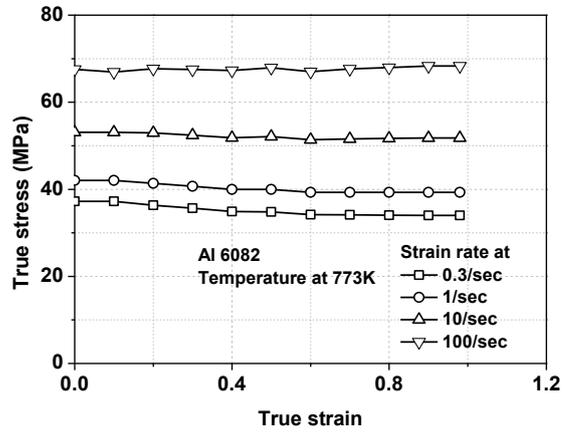
	Heat transfer coefficient(kW/m ² · K)	
	Contact	Convective
Case-1	2.5	0.46
Case-2	Fig. 4	Fig. 6



(a)

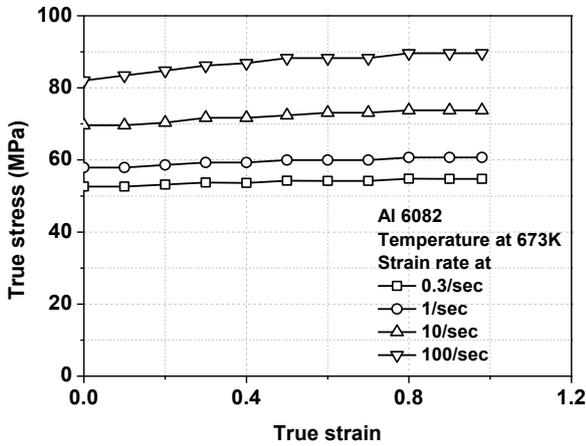


(b)

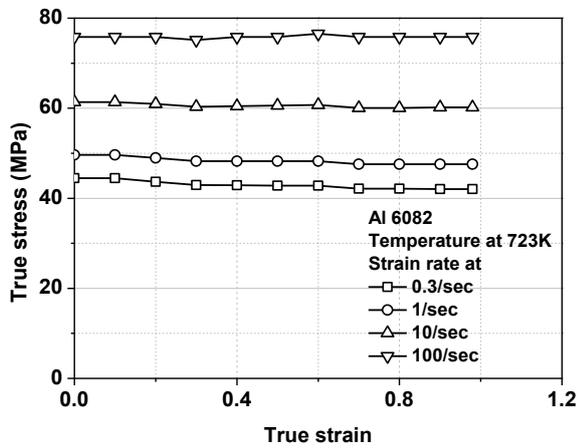


(e)

Fig. 8 The true stress-strain curves of Al6082: (a) 573K, (b) 623K, (c) 673K, (d) 723K, (e) 773K



(c)



(d)

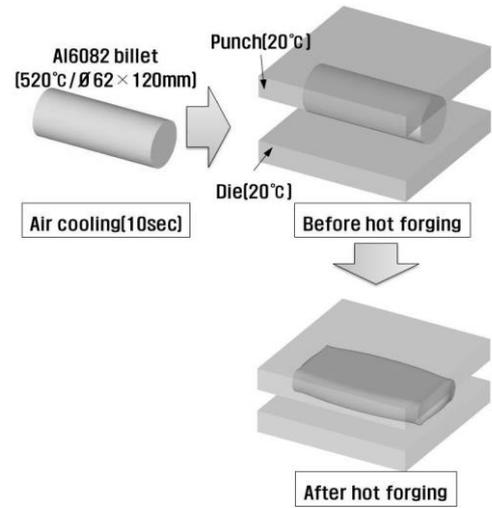


Fig. 9 Hot forging analysis process

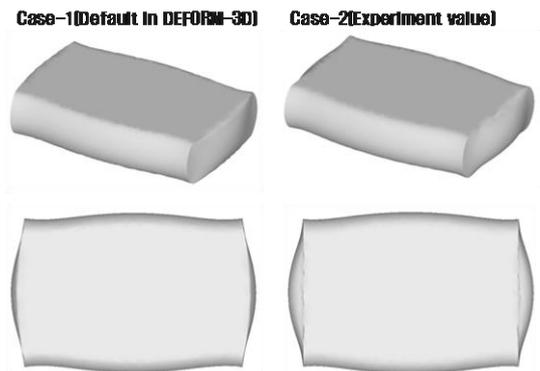


Fig. 10 Forging analysis results according to heat transfer coefficient

3.2 해석 결과

앞의 열간 압축 성형 해석 조건을 이용하여 성형 해석을 수행하였다. 성형 해석 결과 Fig. 10에서 제시된 바와 같이 열전달 계수에 따라 형상 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 차이를 정량적으로 분석하기 위하여 Fig. 11에서 제시된 바와 같이 폭(W) 및 전체 길이(L), 금형과 소재의 접촉부 길이(l)의 치수를 측정하였다. 치수를 측정한 결과 Table 4에서 제시된 바와 같이 비선형 열전달 계수(Case-2) 적용한 성형 해석 결과가 일정한 열전달 계수(Case-1)를 적용한 성형 해석 결과에 비하여 폭은 1.87mm, 전체 길이는 0.99mm 더 길었으며, 금형과 소재의 접촉부 길이는 일정한 열전달 계수(Case-1)를 적용한 성형 해석 결과가 9.53mm 긴 것으로 나타났다. 열전달 계수에 따라 폭 및 전체 길이의 차이가 발생하는 이유는 Fig. 12에서 제시된 바와 같이 열전달 계수 차이에 의한 열간 성형 시 소재 온도의 차이로 보여진다. 일정한 열전달 계수를 적용한 성형 해석보다 비선형 열전달 계수를 적용하여 성형 해석을 하였을 때 표면의 온도가 급격히 냉각되는 것을 확인하였다. 이로 인하여 Fig. 13에서 제시된 바와 같이 소재의 표면응력이 비선형 열전달 계수(Case-2)를 적용한 해석 결과가 일정한 열전달 계수(Case-1)를 적용한 해석 결과에 비하여 높아졌기 때문에 금형과 소재 접촉부의 소재 유동이 비선형 열전달 계수를 적용한 해석 결과가 제한적으로 발생한 것으로 보여진다.

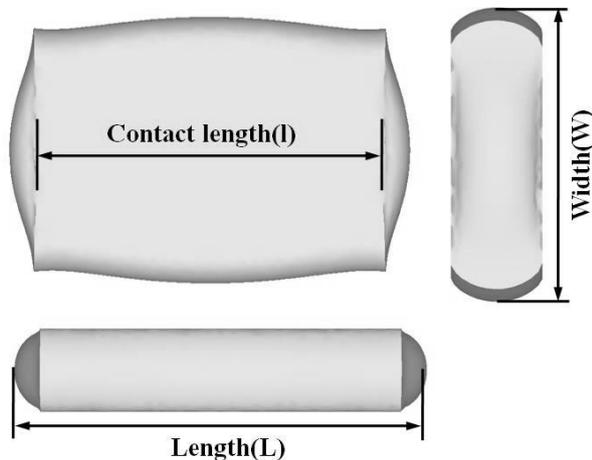
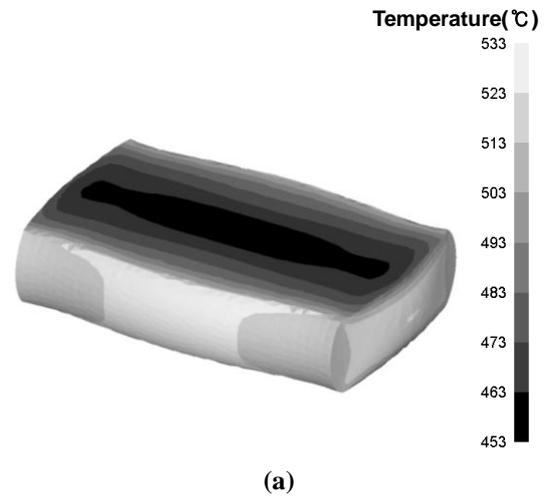
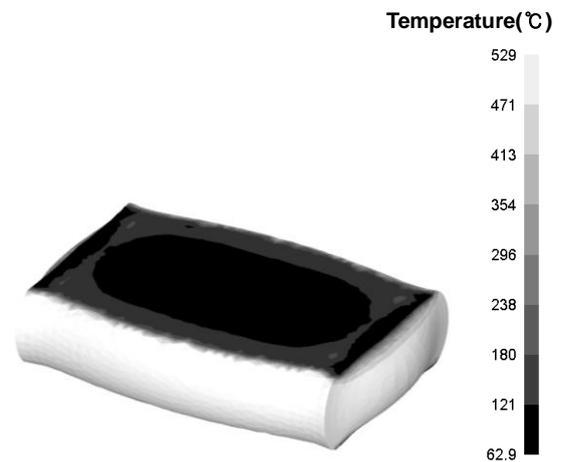


Fig. 11 Dimension measurement parts of analysis result

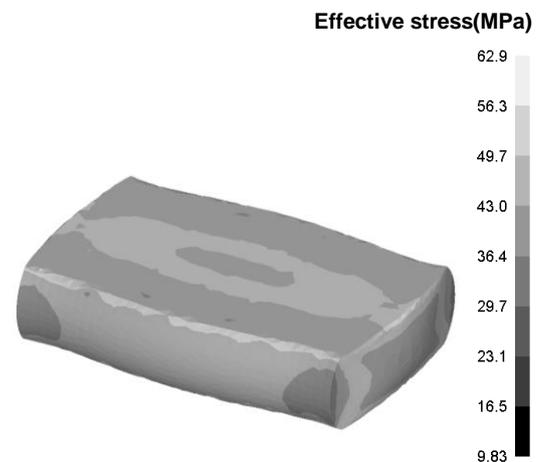


(a)



(b)

Fig. 12 Temperature results according to heat transfer coefficient: (a) Case-1, (b) Case-2



(a)

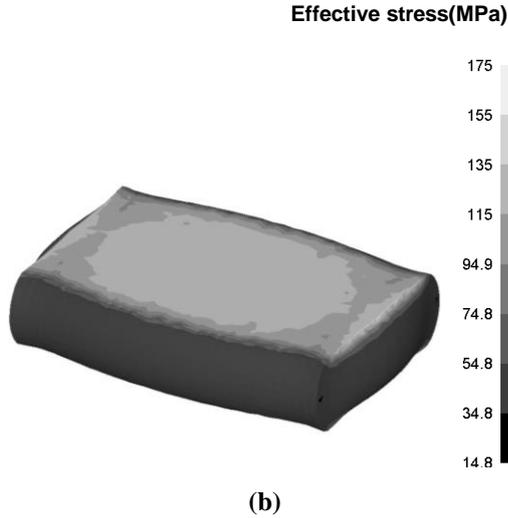


Fig. 13 Stress results according to heat transfer coefficient: (a) Case-1, (b) Case-2

Table 4 Comparison of forming analysis results according to heat transfer coefficient

	Parts of measurement		
	W(mm)	L(mm)	l(mm)
Case-1	96.07	145.26	137.32
Case-2	97.94	146.25	127.79

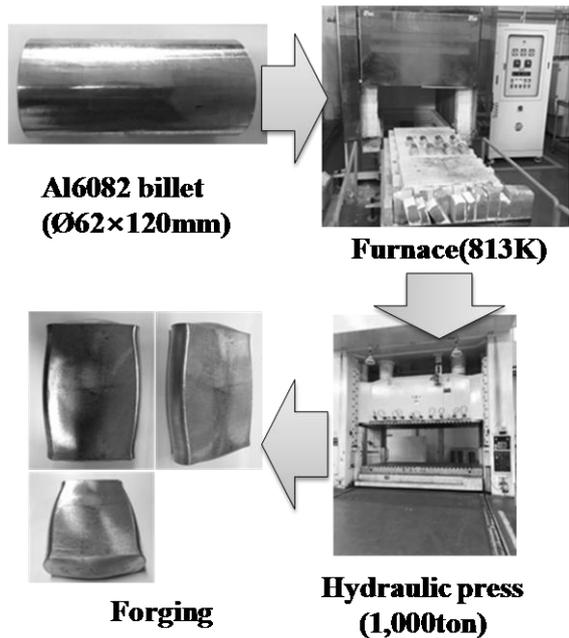


Fig. 14 Hot forging process of Al6082

4. 열간 압축 실험

4.1 실험 조건

앞의 성형 해석 결과를 검증하기 위하여 성형 해석 공정과 동일한 공정으로 실제 열간 압축 실험을 수행하였다. 열간 압축 실험을 위하여 Fig. 14에서 제시된 바와 같이 Al6082 소재를 외경 62mm, 길이 120mm로 절삭 가공하였다. 가공된 소재를 813K로 승온된 가열로에 1시간 동안 가열한 후 압축 실험을 수행하였다. 열간 압축 실험을 수행하기 전 약 10초 동안 이송하여 상온에서 냉각되도록 하였다. 소재가 금형으로 이송이 완료된 후 상형과 하형이 평편한 금형으로 압축율 50%가 될 때까지 압축 성형을 실시하였다. 성형을 위한 장비는 1,000ton 유압 프레스를 이용하였다.

4.2 실험 결과

위의 실험 조건 및 공정을 이용하여 열간 압축 실험을 수행하였다. 열간 압축 실험을 실시한 후 열전달 계수에 따른 성형 해석 결과와 형상을 비교하였다. 일정한 열전달 계수를 적용한 성형 해석 결과와 실제 열간 성형품의 형상 비교는 Fig. 15(a)에서 제시된 바와 같으며, 비선형 열전달 계수를 적용한 성형 해석 결과와 실제 열간 성형품의 형상 비교는 Fig. 15(b)에서 제시된 바와 같다. 금형과 소재 접촉부 및 전체 외부 형상은 일정한 열전달 계수를 적용한 해석 결과보다 비선형 열전달 계수를 적용한 성형 해석 결과가 실제 열간 성형품과 유사한 것으로 보여진다. 정량적인 분석을 위하여 3차원 측정기를 이용하여 Fig. 11에 제시되어 있는 3곳의 치수를 측정하였다. 치수 측정 결과 Table 5에서 제시된 바와 같이 폭(W) 및 금형과 소재 접촉부 길이(l)는 비선형 열전달 계수를 적용하였을 때(Case-2)와 실제 실험 결과와 유사하였으며, 전체 길이(L)는 일정한 열전달 계수를 적용하였을 때(Case-1)와 실제 실험이 유사한 것을 확인할 수 있었다. 열간 압축 성형이 진행됨에 따라 Al6082 소재 표면에 받는 응력이 증가하였고, 이로 인하여 접촉 열전달 계수가 상승하여 금형 접촉부의 소재 유동이 비선형 열전달 계수를 적용한(Case-2) 성형 해석 결과와 유사한 것으로 보여진다.

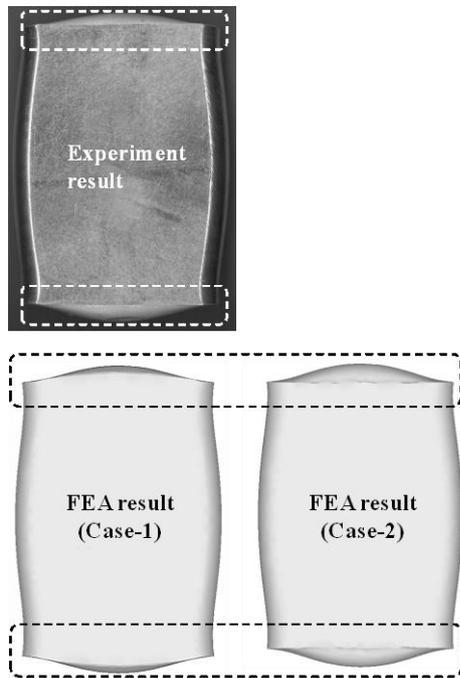


Fig. 15 Comparison of experimental and FE-analysis result

Table 5 Dimensional comparisons of hot forming analysis and experiment

	Parts of measurement		
	W(mm)	L(mm)	l(mm)
Case-1	96.07	145.26	137.32
Case-2	97.94	146.25	127.79
Experiment	98.08	143.97	127.43

5. 결론

본 논문은 Al6082 소재의 열전달 계수가 열간 압축 해석에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 대류 및 접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 실험과 해석을 수행하였다. 실험 및 해석을 통하여 도출된 비선형적 열전달 계수와 일정한 값을 적용한 열전달 계수를 열간 압축 성형 해석에 적용하여 비교하였다. 열간 압축 해석을 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하였다. 열간 압축 해석 결과를 검증하기 위하여 동일한 공정으로 실제 열간 압축 실험을 수행하였다. 열간 압축 실험 후 치수 측정을 통하여 해석 결과와 비교하였다.

(1) 열전달 계수에 따른 압축 해석 후 형상의 차이는 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 정량적 분석을 위하여 3곳에 치수를 측정한 결과 금형과 소재의 접촉부가 9.53mm로 가장 큰 차이를 보였으며, 폭 및 전체 길이는 1.87mm, 0.99mm의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

(2) 비선형 열전달 계수를 적용한 성형 해석 결과를 검증하기 위하여 실제 열간 성형 해석을 수행하였습니다. 열간 성형 실험 결과와 비교하였을 때, 전체적인 형상은 비선형 열전달 계수를 적용한 결과와 유사한 것을 확인할 수 있었습니다. 정량적인 분석을 위하여 실험 결과의 폭(W) 및 전체 길이(L), 금형과 소재의 접촉부 길이(l)을 측정하여 성형 해석 결과와 비교하였다. 비선형 열전달 계수를 적용하였을 때 측정부의 차이는 각 0.14mm, 2.28mm, 0.36mm로 확인되었다. 선형 열전달 계수를 적용하였을 때 측정부의 차이는 각 2.01mm, 1.29mm, 9.89mm로 확인되었다. 실제 실험 결과와 성형 해석 결과를 비교하였을 때 비선형 열전달 계수를 적용한 해석 결과가 실제 결과값과 더 유사한 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지역주력산업육성기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- (1) Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2004, Plastic Deformation Behavior of Al-Mg-Si Alloys at the Elevated Temperatures, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 1, pp. 27~32.
- (2) E. Gokcil, S. Akdi, Y. Birol, 2015, A novel processing route for the manufacture of EN AW 6082 forged components, Mater. Res. Innovations, Vol. 19, pp. 11~14.
- (3) Y. H. Kim, T. K. Ryou, B. B. Hwang, 1999, An Analysis on the Forging Processes for 6061 Aluminum Alloy Wheel, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 5, pp. 498~506.
- (4) Y. H. Kim, T. K. Ryou, H. J. Choi, B. B. Hwang, 2002, An analysis of the forging processes for 6061 aluminum-alloy wheels, J. Mater. Process. Technol., Vol.

- 123, pp. 270~276.
- (5) Y. Zhang, S. Jiang, Y. Zhao, D. Shan, 2013, Isothermal precision forging of complex-shape rotating disk of aluminum alloy based on processing map and digitized technology, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 580, pp. 294~304.
- (6) C. H. Suh, T. H. Kwon, H. W. Jeon, S. K. Oh, C. D. Park, H. Y. Choi, W. S. Moon, 2017, Thermal Deformation Simulation of Boron Steel Square Sheet in Fluid Cooling Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 26, No. 1, pp. 5~10.
- (7) C. H. Suh, T. H. Kwon, K. P. Kang, H.Y. Choi, Y. S. Kim, Y. S. Kim, 2014, Thermo-mechanical Simulation of Boron Steel Cylinders during Heating and Rapid Cooling, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 8, pp. 475~481.
- (8) C. C. Chang, A. N. Bramley, 2016, Determination of the heat transfer coefficient at the workpiece-die interface for the forging process, *J. Eng. Manuf.*, Vol. 216, pp. 1179~1186.
- (9) Z. Malinwski, J. G. Lenard, M. E. Davies, 1994, A study of the heat transfer coefficient as a function of temperature and pressure, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 41, No.2, pp. 125~142.
- (10) A. Polozine, L. Schaeffer, 2005, Exact and approximate methods for determining the thermal parameters of the forging process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 170, No.3, pp. 611~615.
- (11) B. Xiao, G. Wang, Q. Wang, M. Maniruzzaman, R. Sisson, Y. Rong, 2011, An experimental study of heat transfer during forced air convection, *J. Mater. Engineer. Perform.*, Vol. 20, No. 7, pp. 1264~1270.
- (12) V. K. Jain, 1990, Determination of heat transfer coefficient for forging applications, *J. Mater. Shaping. Technol.*, Vol. 8, No. 3, pp. 193~202.
- (13) J. H. Kang, K. O. Lee, S. S. Kang, 2007, Heat transfer coefficient for F.E analysis in the warm forging process, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, Vol. 20, No. 1~2, pp. 367~370.