

## 고온 압축 공정에서 금형과 알루미늄 빌렛의 접촉 열전달 계수 도출에 관한 연구

전효원<sup>1</sup> · 서창희<sup>1#</sup> · 오상균<sup>1</sup> · 권태하<sup>1</sup> · 강경필<sup>2</sup> · 육형섭<sup>3</sup>

### A Study on Derivation of Contact Heat Transfer Coefficient Between Die and Aluminum Billet in High Temperature Compression Process

H. W. Jeon, C. H. Suh, S. G. Oh, T. H. Kwon, G. P. Kang, H. S. Yook

(Received February 25, 2021 / Revised May 31, 2021 / Accepted June 1, 2021)

#### Abstract

In hot forging analysis, the interfacial heat transfer coefficient (IHTC) is a very important factor defining the heat flow between the die and the material. In particular, in the hot forging analysis of aluminum 6xxx series alloy, which are used in automobile parts, differences in load and microstructure occur due to changes in surface temperature according to the IHTC. This IHTC is not a constant value but changes depends on pressure. This study derived the IHTC under low load using aluminum 6082 alloy. An experiment was performed by fabricating a compression die, and a heat transfer analysis was performed based on the experimental data. The heat transfer analysis used DEFORM-2D, a commercial finite element analysis program. To derive the IHTC, heat transfer analysis was performed for the IHTC in the range of 10 to 50 kW/m<sup>2</sup>°C at intervals of 10kW/m<sup>2</sup>°C. The heat transfer analysis results according to the IHTC and the actual experimental values were compared to derive the IHTC of the aluminum 6082 alloy under low load.

**Keywords** : Automobile parts, Al 6082, Hot forming, Heat transfer coefficient , DEFORM-2D

## 1. 서 론

최근 자동차 산업은 내연기관에서 전기에너지 또는 수소에너지와 같은 차세대 에너지를 이용하는 산업으로 변화하고 있다. 차세대 에너지를 이용하는 자동차의 경우 연비 향상을 위하여 자동차 부품의 경량화에 초점을 맞추어 연구개발이 진행되고 있다. 자동차 부품의 경량화는 알루미늄 합금과 같은 경량소재를 이용하거나 고강도강을 적용

하여 무게를 감소시키는 방법 등을 적용하고 있다. 알루미늄 합금을 이용한 자동차 부품 개발 시 열처리에 의하여 우수한 기계적 성질을 가질 수 있고, 고온에서 성형성이 우수한 알루미늄 6xxx계열 합금을 널리 사용한다. 알루미늄 합금은 강에 비하여 높은 비열 및 열전도도, 열확산율을 가지고 있기 때문에 고온에서 성형 시 대기 및 금형으로 열전달이 강에 비하여 빠르게 진행된다[1]. 알루미늄 합금의 고온 성형 시 빠른 열전달은 형상 및 미세조직 등에 영향을 미친다. Jeon 외 6명은 알루미늄 6082소재의 열간 성형 시 접촉열전달 계수에 따라 소재 표면의 온도와 형상 변화에 대하여 유한요소

1. 대구기계부품연구원 연구개발본부 뿌리기술연구팀

2. 솔루션랩 기술연구소, 부장

3. DAS 연구기획팀

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

해석을 통하여 확인하였으며, 실험을 통하여 열전달 계수를 도출하였다[2]. 알루미늄 합금의 고온 성형 시 소재 및 금형 온도 및 변형율, 변형율 속도에 따라 재결정이 발생하며, 열처리 후 재결정은 조대한 조직으로 성장하게 된다. 조대한 조직은 피로 특성에 영향을 주어 낮은 내구성을 가지게 하는 원인이 된다[3]. 이와 같이 알루미늄 합금의 고온 성형에서 재결정을 예측하기 위하여 Elizabeth 외 3명은 Al6082와 Al6061을 이용하여 압출 공정에서 동일한 온도의 금형을 이용하여 출구속도 및 온도에 따라 재결정 여부에 대하여 실험적으로 검증하였다[4]. Chen 외 4명은 Al-Zn-Mg 합금을 이용하여 포트홀 압출에서 동적 재결정에 대한 연구를 수행하였다. Arrhenius 모델과 modified Johnson-cook 모델을 기반으로 새로운 구성방정식을 도출하였고, 이를 이용하여 유한요소 해석에 도입하여 재결정 영역을 예측하였다[5]. 이와 같은 알루미늄 재결정에 대한 연구들의 정확성 향상을 위해서는 단조나 압출공정 중 소재의 온도 변화를 정밀하게 예측할 필요성이 있으며, 특히 주요한 영향을 미치는 접촉 상태에서 열전달계수의 도출이 중요하다.

Chen 외 4명이 수행한 유한요소 해석에서 열전달 계수는 공기와 접촉하는 부분은 0.02N/s/mm/K, 소재와 금형 사이에 접촉하는 부분은 11 N/s/mm/K으로 일정한 값을 설정하였다. Wilson 외 2명은 단조 공정에서 금형과 소재의 접촉은 두 물체의 표면 거칠기로 인하여 부분 접촉되어 있고, 이로 인하여 열전달 계수를 비선형적으로 도출하였다[6]. Wilson 외 2명과 같이 성형 공정에서 비선형적인 열전달 계수를 도출하기 위한 많은 연구가 진행되었다. Jain은 알루미늄 2024-T4, 2024-O, 6061-O, 1100-O를 이용하여 바 형태의 시편에 열전대를 연결한 후 양쪽에 압력을 가하여 압력에 따른 열전달 계수를 도출하였다[7]. Xiao 외 4명은 알루미늄 7075의 외경 100mm 두께 2mm 판재를 이용하여 원의 중심부에서 가장자리부로 거리에 따라 열전대를 부착한 후 압력에 따른 열전달 계수를 도출하였다[8]. Kang 외 3명은 알루미늄 5754 판재 인장시편 형상을 글리블 실험기에서 저항 가열 후 압력에 따른 온도 변화를 측정하였다. 측정된 데이터를 유한요소 해석에 적용하여 압력에 따른 열전달 계수를 도출하였다[9]. Liu 외 5명은 알루미늄 7075의 120×10×2mm 판재 소재를 이용하여 저항 가열 후 압력에 따른 온도

변화를 확인하였다. 압력에 따른 온도데이터를 이용하여 판재 전용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 압력에 따른 열전달 계수를 도출하였다[10].

이러한 연구들은 대부분 판재소재를 사용하였으며, 고온에서의 접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 주로 저항가열방법을 사용하였다. 하지만 열간 단조에서는 주로 원통형의 빌렛을 사용하고 분위기가열방식을 적용하기 때문에 기존 연구들에서 도출된 접촉 열전달 계수들을 열간단조에 적용가능한지에 대한 의문이 남아있다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금의 열간 단조 공정에 적합한 접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 외경 62mm에 두께 30mm인 원통형 시편을 이용하여 실제 공정에서 사용되는 분위기 가열방식을 적용하여 접촉 열전달 계수를 도출하고자 하였다. 소재는 알루미늄 6082 소재를 이용하였으며, 가열은 564°C로 승온 후 3ton의 하중을 부과하였다. 하중이 가해졌을 때 하중에 따른 온도 변화 데이터를 구하였으며, 유한요소 해석을 이용하여 접촉 열전달 계수를 도출하였다.

## 2. 열간 압축 실험

### 2.1 압축실험 조건

접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 연속주조를 통하여 제작된 알루미늄 6082소재를 이용하였으며, Table.1에서 제작된 알루미늄 6082소재의 성분분석 결과를 나타냈다.

알루미늄 6082 소재의 시편 크기는 외경 62mm에 두께 30mm로 가공하였으며, 열전대를 부착하기 위하여 Fig.1에서 제시된 바와 같이 소재 표면에서 1mm 여유를 남기고 외경 1.6mm로 홀 가공을 수행하였다. 압축 실험을 위한 금형은 SKD11을 사용하였으며, Fig.2에서 제시된 바와 같이 설계하였다. 압축실험 시 금형의 표면 온도를 측정하기 위하여 알루미늄 6082 시편을 가공한 것과 동일하게 표면에서 1mm의 여유를 남기고 1.6mm로 홀가공을 수행하였다.

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

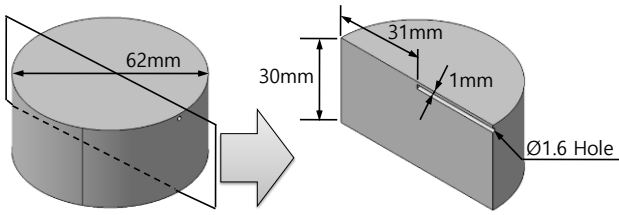


Fig. 1 Specimen for deriving interfacial heat transfer coefficient

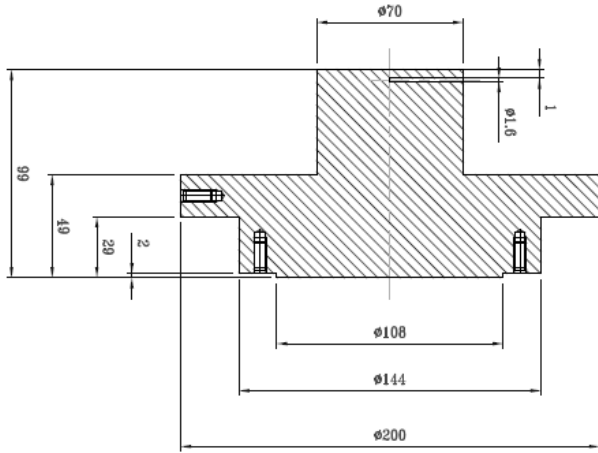


Fig. 2 Die drawing for derivation of interfacial heat transfer coefficient

2.2 압축실험 결과

접촉열전달 계수를 도출하기 위하여 열간 압축 실험을 수행하였다. 실제 알루미늄 킷롤 압과 같은 열간 단조 공정을 수행 시 시편을 배치로에 투입 후 약 560℃까지 가열하여 성형을 실시한다. 본 실험을 일반 알루미늄 열간 단조 공정과 유사하게 수행하기 위하여 열간 압축 실험은 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 하중 제어가 가능한 고온 압축 성형기를 이용하였다. 고온 압축 실험을 위하여 Fig. 2에서 제시된 설계 도면을 활용하여 압축 금형을 제작하였다. 제작된 압축 금형은 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 K-type 열전대를 부착하여 고온 압축 성형기에 설치하였다. 알루미늄 6082 소재의 온도 측정을 위하여 Fig. 4에서 제시된 바와 같이 외경 1.6mm로 홀가공된 부분에 K-type 열전대를 삽입 후 고정하였다. K-type 열전대가 삽입된 알루미늄 6082 소재의 가열을 위하여 570℃까지 승온된 가열로에 2시간 동안

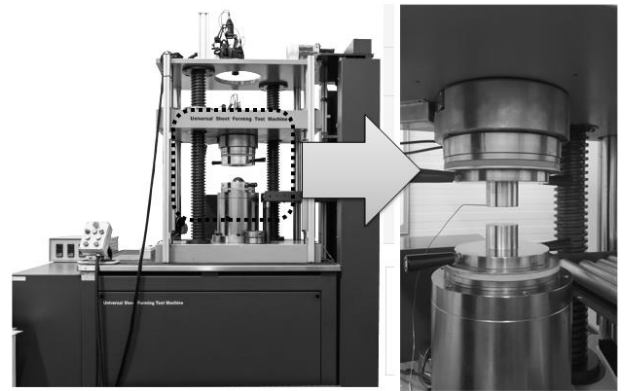


Fig. 3 High temperature compression machine and die

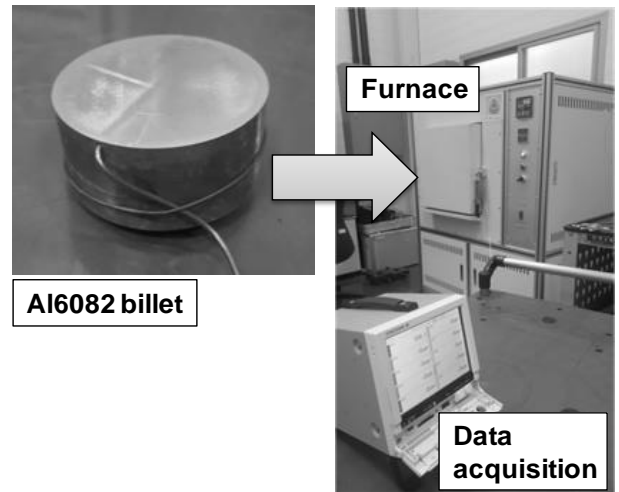


Fig. 4 Heating furnace and specimen for heating aluminum 6082

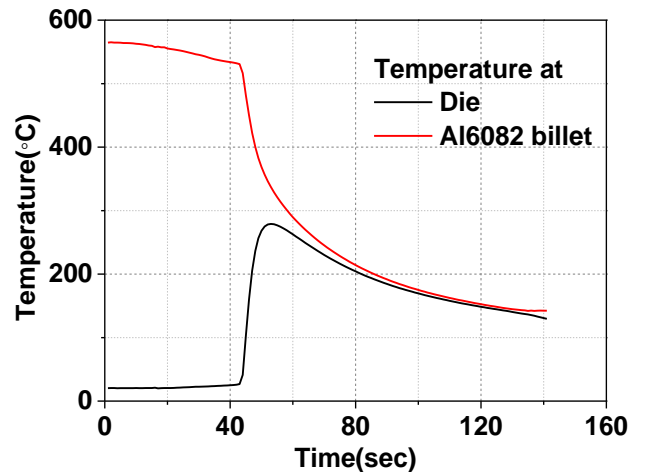


Fig. 5 Temperature profile of die and aluminum 6082 measured during compression test

가열하여 565°C까지 승온하였다. 565°C까지 승온된 알루미늄 6082 소재의 압축 실험을 위하여 가열로에서 압축 금형으로 이송하였다. 이송에 소요된 시간은 약 40초이며, 온도는 565°C에서 530°C까지 변화한 것을 확인할 수 있었다. 가열된 알루미늄 6082 소재의 이송이 완료 후 3ton의 하중으로 가압하였을 때 Fig. 5에서 제시된 바와 같이 소재의 온도는 약 530°C도에서 급격히 하강하는 것을 확인할 수 있었으며, 금형의 온도는 약 25°C에서 약 278°C까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 금형의 온도가 최고 온도에 도달한 이후 금형과 소재의 온도는 비슷한 경향을 보이며 하강하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 열전달 해석

#### 3.1 해석 조건

앞장의 실험 결과를 바탕으로 저하중에서 알루미늄 6082 소재의 접촉 열전달 계수 도출을 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 열전달 유한요소 해석을 위하여 상용 해석 프로그램인 DEFORM-2D를 활용하였다. 알루미늄 6082 소재와 금형간의 열전달 해석을 모사하기 위하여 알루미늄 및 금형간의 열전도도 및 열용량을 도출하였다. 알루미늄 6082의 열전도도 및 열용량은 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 Jeon 외 6명이 JMatpro를 활용하여 도출한 것을 활용하였다[2]. 금형간의 열전도도 및 비열은 Table. 2에서 제시된 바와 같이 B. Izquierdo외 3명이 제시한 온도에 따른 열전도도 및 비열을 활용하였다[11]. 알루미늄 6082 소재와 공기의 대류 열전달 계수는 Fig. 7에서 제시된 바와 같이 Jeon외 6명이 실험 및 열전달 해석을 통하여 얻어진 데이터를 활용하였다[2].

열전달 해석을 위하여 Fig. 8에서 제시된 바와 같이 외경 62mm, 두께 30mm의 알루미늄 6082 소재를 축대칭으로 모델링 하였다. 축대칭 형상의 알루미늄 6082 소재는 이송 시간을 고려하여 공기 중에 42초간 열전달이 이루어지도록 해석을 수행하였으며, 공기 중 열전달 후 3ton의 하중으로 60초 동안 가압하는 해석을 수행하였다. 저하중에서 알루미늄 6082 소재의 접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 10~50kW/m<sup>2</sup>까지 10kW/m<sup>2</sup> 간격으로 총 5회 열전달 해석을 수행하였다.

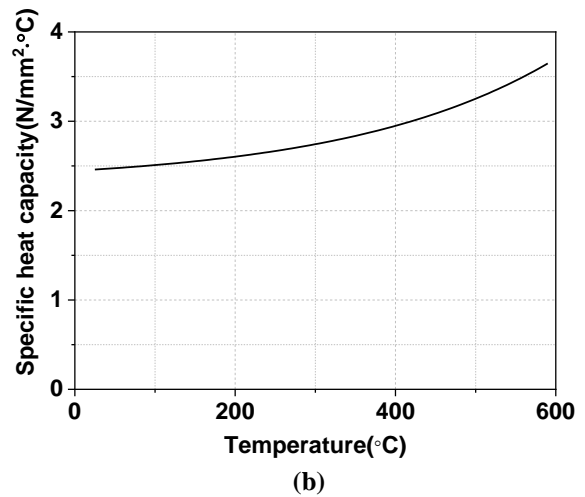
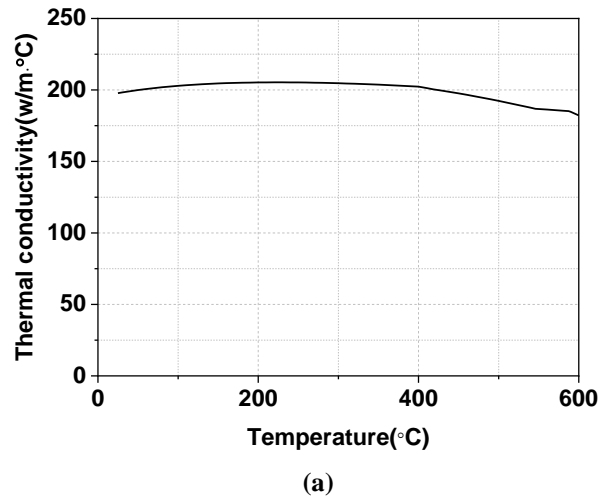


Fig. 6 Thermal properties data of Al6082: (a) Thermal conductivity, (b) Heat capacity

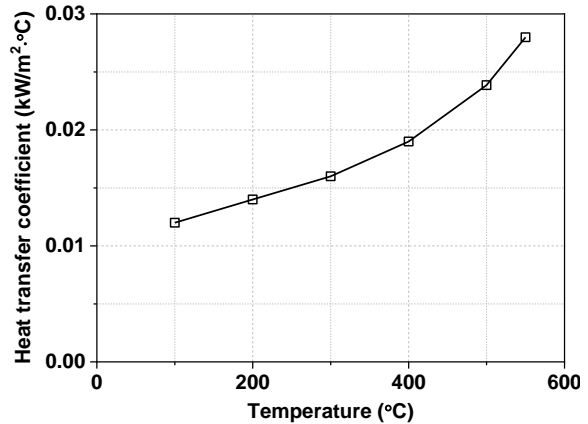


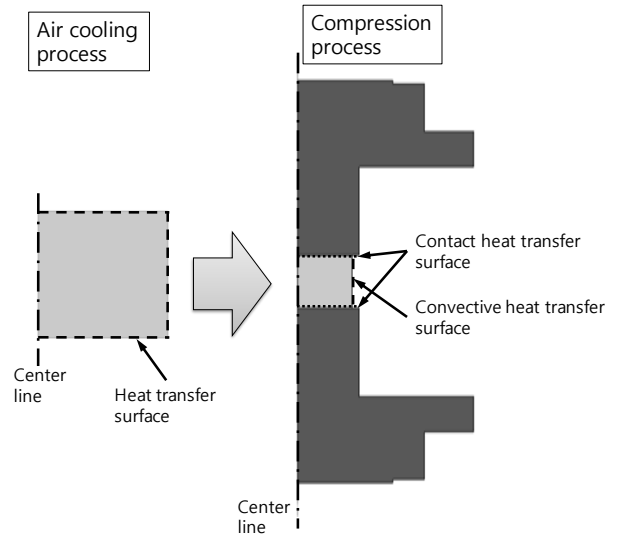
Fig. 7 Convective heat transfer coefficient of Al6082[2]

**Table 2 Specific heat capacity and thermal conductivity according to the temperature of the die steel[11]**

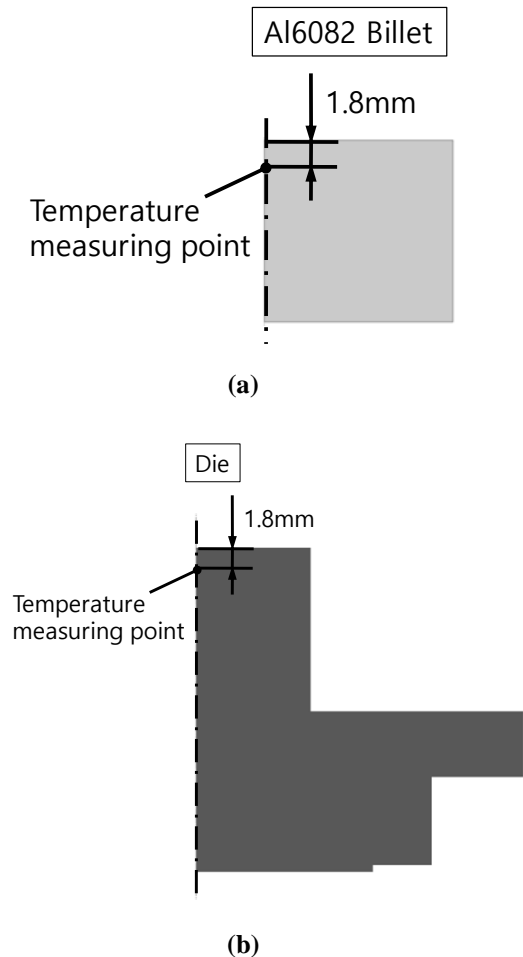
Temperature (°C)	Thermal conductivity (w/m · °C)	Specific heat capacity (J/kg · °C)
30	19.79	461.05
200	21.95	541.4
400	24.5	635.9
600	27.03	730.4

**3.2 열전달해석 결과**

앞장의 열전달 해석 조건을 활용하여 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 해석은 접촉열전달 계수에 따라 총 5회에 걸쳐 해석을 진행하였다. 알루미늄 6082 소재의 접촉 열전달 계수에 따른 온도 변화를 확인하기 위하여 Fig. 9에서 제시된 바와 같이 실제 실험에서 온도를 측정된 부위와 동일한 부위의 온도를 측정하였다. 열전달 해석을 통하여 얻어진 데이터와 실제 실험 데이터를 비교한 결과는 Fig. 10에서 제시된 바와 같다. 알루미늄 6082 소재를 가열로에서 취출 후 압축 금형으로 이송되는 42초까지 공기와 접촉을 통하여 발생하는 열손실은 접촉열전달 계수 값에 상관없이 동일하며, 열전달 해석과 실험이 매우 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 알루미늄 6082 소재를 압축 금형에 안착 후 3ton의 하중으로 가압 시 42초까지 해석과 실험 값이 유사한 경향을 보였으나, 42초 이후부터는 실험과 열전달 해석에서 냉각속도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 열전달 해석에서 접촉열전달 계수가 20kW/m<sup>2</sup>°C 이상에서 냉각속도의 차이는 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 접촉 열전달 계수가 10kW/m<sup>2</sup>°C에서 실제 실험값과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 열전달 해석 시 알루미늄 6082 소재의 열전달 계수에 따른 금형강의 온도 변화는 Fig. 11에서 제시된 바와 같다. 상온의 금형강에 알루미늄 6082소재가 안착되면서 미세한 온도 상승이 발생하였으며, 안착이 완료 후 가압하였을 때 접촉 열전달 계수에 따라 약 281 ~ 317°C까지 금형강의 온도가 상승하는 것을 확인하였다. 금형강의 온도가 최고 온도에 도달한 이후부터 완만한 곡선을 그리며 하강하는 것을 확인할 수 있었다. 열전달 해석도 실제 실험과 유사한 경향을 보이는 것을 확



**Fig. 8 Modeling for heat transfer analysis of Al6082 billets**



**Fig. 9 Temperature measurement part after heat transfer analysis ; (a) Al6082 billet, (b) Die**

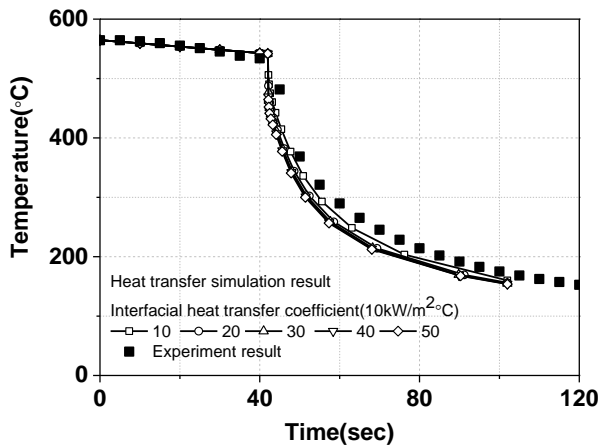


Fig. 10 Heat transfer analysis and comparison of test results of Al6082 billet

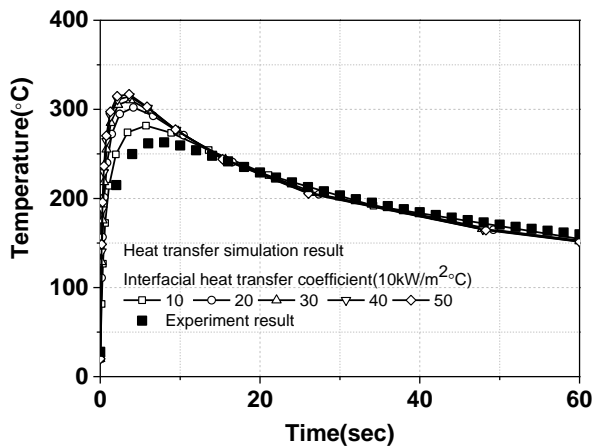


Fig. 11 Heat transfer analysis of Die steel and comparison of experimental results

인할 수 있었으나, 열전달 계수가  $30\text{kW/m}^2\text{C}$  이상에서 온도의 변화의 차이가 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 알루미늄 6082 빌렛의 열전달 계수가  $10\text{kW/m}^2\text{C}$ 일 때 열전달 해석의 결과값과 실제 실험값이 가장 유사한 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문은 고온압축 시 알루미늄 6082 소재의 접촉 열전달 계수를 도출하고자 하였다. 접촉 열전달 계수를 도출하기 위하여 열간 압축 실험을 수행하

였으며, 실험 데이터를 바탕으로 열전달 해석을 수행하여 접촉열전달 계수를 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 알루미늄 6082 빌렛을 활용하여 가열, 이송, 고온 압축 실험시 온도 데이터를 획득하였다.
- (2) 실험에서 얻어진 온도데이터를 바탕으로 유한 요소모델을 구성하여 열전달계수 역추적기법을 통해서 접촉열전달 계수를 도출하였다.
- (3) 알루미늄 6082 빌렛의 열전달 해석 시 접촉 열전달 계수에 따른 금형의 온도 변화를 실제 실험과 비교하였으며, 접촉 열전달 계수가  $10\text{kW/m}^2\text{C}$ 일 때 열전달 해석에서 금형강의 온도 변화가 실제 실험값과 가장 유사한 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(20004965)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- (1) J. Sengupta, B.G. Thomas, M.A. Wells, 2005, The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 36A, pp 187~204. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0151-y>
- (2) H.W. Jeon, C. H. Suh, T. H. Kwon, C. D. Park, J. H. Jeon, H. Y. Choi, G. P. Kang, 2019, Analysis of hot compression process of aluminum 6082 billet using nonlinear heat transfer coefficient, *Trans. Mater. Process*, Vol. 28, pp 5~14. 10.5228/kstp.2019.28.1.5
- (3) O. Vladivoj, S. Peter, 2011, The effect of surface recrystallized layers on properties of extrusions and forgings from high strength aluminium alloys, *Metal* 2011, pp 1~7
- (4) S. Elizabeth, C. Sally, D. Natalia, Z. Xinquan, 2004, Effects of extrusion parameters on coarse grain surface layer in 6xxx series extrusion, *aluminum extruders council and the aluminum association.*, pp 115~126
- (5) G. Chen, L. Chen, G. Zhao, W. Cui, 2017, Microstructure analysis of an Al-Zn-Mg alloy during porthole die extrusion based on modeling of constitutive equation and dynamic recrystallization, *J.*

- Alloy. Compound., Vol. 710, pp 80~91.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.240>
- (6) W. Wilson, S. Schmid, J. Liu, 2004, Advanced simulations for hot forging\_heat transfer model for use with the finite element method, J. Mater. Process. Technol., Vol.155-156, pp 1912~1917.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.399>
- (7) V. K. Jain, 1990, Determination of heat transfer coefficient for forging applications, J. Mater. Shaping. Technol., Vol. 8, No. 3, pp. 193~202.  
<https://doi.org/10.1007/bf02833814>
- (8) W. Xiao, B. Wang, K. Zheng, J. Zhou, J. Lin, 2018, A study of interfacial heat transfer and its effect on quenching when hot stamping AA7075, Arch. Civ. Mech. Eng., Vol. 18, pp 723~730.  
<https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.12.001>
- (9) K. Ji, O. Fakir, H. Gao, L. Wang, 2015, Determination of heat transfer coefficient for hot stamping process, Mater. Today: Proc, pp 434~439.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.059>
- (10) X. Liu, K. Ji, O. Fakir, H. Fang, M. Gharbi, L. Wang, 2017, Determination of the interfacial heat transfer coefficient for a hot aluminium stamping process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 247, pp 158~170.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.005>
- (11) B. Izquierdo, J. Sanchez, S. Plaza, N. Ortega, I. Pombo, Inverse Determination of Discharge Properties based on Surface Finish and Material Removal Rate Predictions Using Thermal Multi-Spark Modeling of the EDM Process, 2009, AIP Conf. Proc., Vol. 464.  
<https://doi.org/10.1063/1.3273664>