

충격하중에 의한 1180MPa급 초고강도강의 단열해석

김건우*, 이재욱*[#], 양민석*, 이승엽*, 김다혜*, 이재진**, 문지훈**, 박지원***

*한국생산기술연구원 대경본부, **경북하이브리드부품연구원, *** (주)삼연기술

Adiabatic Analysis of 1180MPa Advanced High Strength Steel by Impact Weight

Kun-Woo Kim*, Jae-Wook Lee*[#], Min-Seok Yang*, Seong-Yeop Lee*, Da-Hye Kim*, Jae-Jin Lee**,
Ji-Hoon Mun**, Ji-Won Park***

*Korea Institute of Industrial Technology, **Gyeongbuk Hybrid Technology Institute, ***Samyeon
Tech

(Received 28 May 2022; received in revised form 16 June 2022; accepted 24 June 2022)

ABSTRACT

Adiabatic blanking is a method to improve productivity through an autocatalytic cycle that occurs repeatedly through plastic deformation and thermal softening caused by impact energy. In this study, an axisymmetric analysis model comprising a punch, die, holder, and specimen was developed to confirm the temperature and deformation characteristics caused by an impact load. Through this, the impact energy, diameter of the punch, gap between the punch and die, and the effect of the fillet were analyzed. Because this process occurs in a very short time, adiabatic analysis can be performed using the explicit time-integration method. The analysis, confirmed that it is necessary to design a structure capable of increasing the local temperature and plastic deformation by controlling the impact energy, working area, gap, and the fillet.

Keywords : Adiabatic Analysis(단열해석), Impact Weight(충격하중), Axisymmetric Model(축대칭 모델), Advanced High Strength Steel(초고강도강)

1. 서 론

판재에서 원하는 형상의 부품을 얻기 위한 방법으로 상용 블랭킹(conventional blanking)과 정밀 블랭킹(fine blanking)이 주로 사용되고 있다^[1]. 상용 블랭킹은 절단면이 기능적으로 중요하지 않은 경우에 주로 활용되며, 정밀 블랭킹은 절단면이 기능적

요구조건을 충족해야 하는 경우 주로 사용되나 생산효율이 낮은 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 독일 프라운호퍼에서 개발된 단열 블랭킹(adiabatic blanking) 방법은 표면 품질 및 생산성 향상에 이점이 있어 주목받고 있다^[2]. 일반적으로 정밀 블랭킹 대비 단열 블랭킹을 활용할 경우 생산율을 50% 이상 높일 수 있고, 공구비용을 25% 이상 절감할 수 있다. 또한 윤활유가 필요없고 따라서 제거제가 필요없으며, 버를 제거하기 위한 후공정 역시 필요없어 비용절감에 효과적이다^[1].

Corresponding Author : jaewk@kitech.re.kr
Tel: +82-53-580-0186, Fax: +82-53-580-0120

단열 블랭킹의 원리는 고속 충격에 의해 절단면이 순간적으로 소성변형구간에 들어서면서 고온의 전단밴드(shear band)가 형성되고, 열적으로 연화된 부위가 떨어져 나가는 것이다. 매우 짧은 시간에 소성변형에 의한 열적 연화, 다시 열적 연화에 의한 소성변형이 반복되는데 이를 자기 촉매적 순환(auto-catalytic cycle)이라 한다. 단열 블랭킹에서 절단면의 특성을 결정하는 요인은 충격에너지와 더불어 펀치와 다이의 간극(clearance)이다. 간극에 따라 S 형상으로 표현되는 절단면 형상이 달라지는데 충격에너지가 크고 간극이 작을수록 전단밴드의 길이가 줄어들게 된다³⁾. 따라서 부품의 형상에 적합한 충격에너지와 간극, 금형형상등을 결정하는 것이 필요하다⁴⁾.

단열해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 고려사항을 확인해야 한다⁵⁾. 우선 주변환경과 완벽하게 절연되어 있어야 하며, 재료에 작용하는 소성변형이 열을 발생시켜야 한다. 이것은 단열해석에서 소성 열 분율(inelastic heat fraction)로 표현할 수 있다. 또한 충격이 매우 짧은 시간에 발생하며, 재료에서 열이 전도될 시간이 없으므로 해당 지점에서 생성되는 열은 해당 지점에 머무른다. 이는 유한요소해석 관점에서 현재 요소에서 발생한 열이 바로 옆의 요소로 전달되지 않는 것을 의미한다. 이와 같은 조건들을 확인하면 고속 충격에 단열해석을 수행하는 본 연구가 적합한 것을 확인할 수 있다. 이는 2장에서 확인하도록 한다.

변형률-응력 선도에서 구조강의 기계적 물성을 관찰하면 다음과 같은 특성이 나타난다⁶⁾. 첫째, 온도가 증가할수록 항복강도는 낮아진다. 둘째, 변형경화량은 항복강도가 증가할수록 감소한다. 셋째, 변형 경화는 온도가 증가할수록 감소한다. 넷째, 변형률 증가에 따른 강도 증가는 온도상승과 함께 증가한다³⁾. 이를 바탕으로 본 연구에서는 충격에너지, 펀치의 직경, 펀치와 다이의 간극, 다이의 필렛이 시편의 변형 및 온도상승에 미치는 영향을 확인하고자 한다⁷⁾. 기존 문헌에서 제시된 1mm 두께 판재의 최대온도 및 최대변형률을 근거로 해석모델을 구현하였으며, 3장에서 해석결과를 제시한다.

그리고 4장에서 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 충격하중 단열해석 모델

Xia et al.¹⁷⁾은 다양한 에너지수준에서 초고강도강에 대한 낙하충격시험을 수행하였고, 시편의 온도, 변형등을 확인하였다. 이에 상응하는 다이, 홀더, 펀치, 시편으로 구성된 축대칭 단열해석 모델이 Fig. 1에 나타나 있다. 다이와 홀더는 강체로 고려하였고, 펀치와 시편은 탄성체로 구성하였으며, 펀치의 초기속도를 통해 충격에너지를 전달하도록 하였다. Table 1에 제시된 바와 같이 기준이 되는 인자로 충격에너지는 90J, 펀치 직경은 16mm, 펀치와 다이의 간극은 2mm, 다이의 필렛은 1mm이다.

충격하중으로 인해 극히 짧은 시간동안 국부적인 변형이 발생하고 변형으로 인해 열이 발생한다. 온도가 높을수록 재료가 연화되는 특성에 근거하면 온도에 따른 변형률-응력 선도를 찾아야 한다. Xia et al.은 크랙이 발생하기 전에 해당하는 낙하충격에너지저항 90J에서 180~185°C의 최대온도, 6.40~6.50mm 사이에서 최대변위가 발생한다고 언급하였다. 해당 수치에 근거하여 변형률-응력을 유추하였으며 182°C에서의 소성 변형률은 상온에서의 소성 변형률보다 크며 항복응력과 인장응력은 낮다고 가정하였다. 90J의 운동에너지를 발생시키기 위해 14.30kg의 펀치에 3552mm/s의 속도로 시편을 타격하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 90J에서 183°C, 6.45mm의 온도와 변위가 예측되며, 이 수치는 Xia et al.의 연구에서 시험한 값과 거의 일치한다. 또한 시간이 흐름에 따라 온도 증가와 함께 국부적인 변형 증가를 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

만약 상온에서의 변형률-응력선도만을 사용할 경우 90J에서 최대온도는 152°C, 최대변위는 5.97mm로 나타난다. 이는 온도에 의한 변형률-응력선도가 적용되지 않음에 따라 해석결과와 시험결과에서 차이가 발생한다는 것을 의미한다.

Table 1 The reference parameters for the adiabatic analysis

Energy [J]	90
Punch diameter [mm]	16
Clearance [mm]	2
Fillet [mm]	1

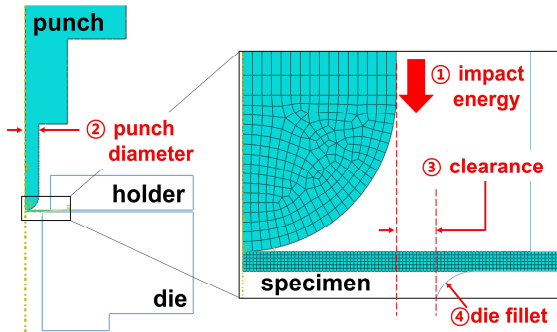


Fig. 1 The axisymmetric model

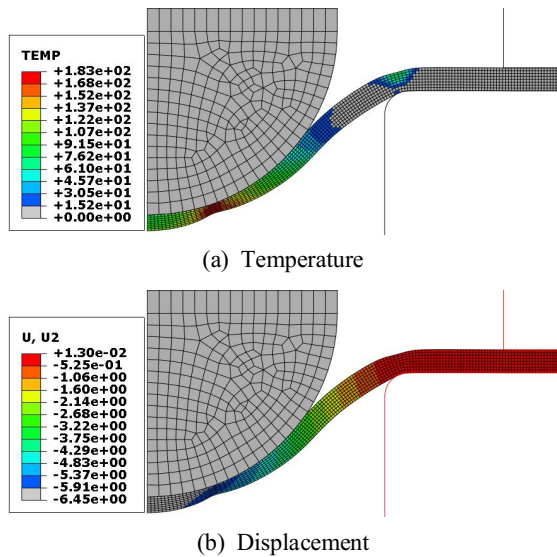


Fig. 2 The maximum temperature and displacement on the specimen

본 연구의 해석결과들은 충격하중에 의해 매우 빠른 시간내에 사건이 이루어지므로 외재적 시간 적분법(explicit time integration)을 활용하여 수행하였다. 외재적 시간 적분법을 활용할 경우 총에너지(total energy)가 일정하게 유지되는지 확인하는 것이 반드시 필요하다. 운동에너지(kinetic energy), 변형에너지(strain energy), 총에너지가 Fig. 4에 제시되어 있다. 초기상태에서는 총에너지가 운동에너지만으로 표현되며, 0.003초 부근에서 변형에너지는 최대가 되고 운동에너지는 최소가 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 펀치가 시편에 최대로 절입되는 시점을

의미하며, 시편의 탄성으로 인해 되돌아오는 시점을 의미한다. 총에너지가 해석시간 동안 90J로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 시간 적분에 관해 신뢰성 있는 모델이 구축되었음을 주장할 수 있다.

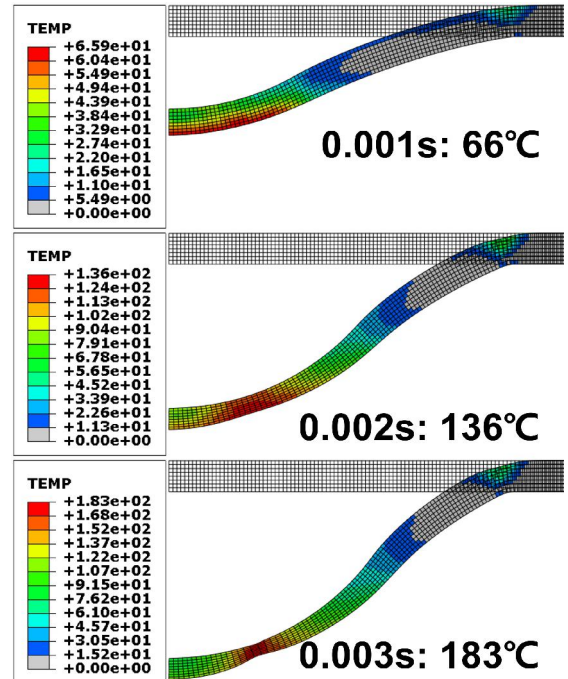


Fig. 3 Temperature on the specimen

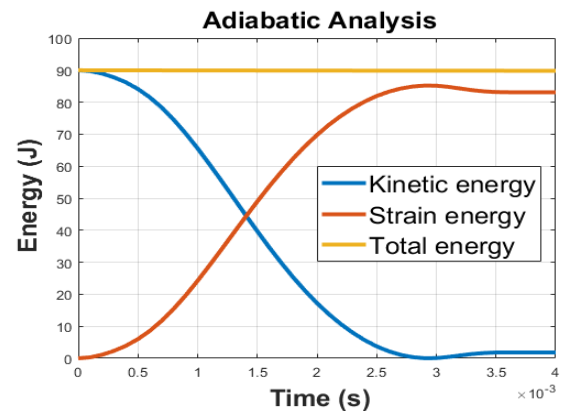


Fig. 4 Kinetic, strain and total energy for the explicit time integration

3. 충격하중 단열해석 결과

3.1 충격에너지의 영향

70J의 충격에너지에서도 0.003초 이내에 최대온도가 발생하며, 따라서 70J, 80J, 90J의 충격에너지에 대한 영향을 분석하도록 한다. Table 1에는 Xia et al.의 시험결과와 본 연구에서 수행한 단열해석결과가 제시되어 있다. 70J에서 온도차가 약 10℃정도 발생하며, 80J에서 변위차가 약 0.08mm정도 발생하나 대체로 해석결과가 시험결과를 추종한다. Fig. 4에는 단열해석을 통한 최대온도 및 최대변위가 제시되어 있으며, 충격에너지가 증가할수록 최대온도와 최대변위 모두 증가하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 단열 블랭킹에서 금형의 내구성을 고려하여 충격에너지를 가능한 높임으로써 국부적인 온도 상승을 유발하는 것이 필요하다.

Table 1 The maximum temperature and displacement according to impact energy

Energy [J]		Temperature [°C]	Displacement [mm]
70	Xia et al.	141	5.60
	Adiabatic	131	5.61
80	Xia et al.	146	6.10
	Adiabatic	149	6.02
90	Xia et al.	182	6.40
	Adiabatic	183	6.45

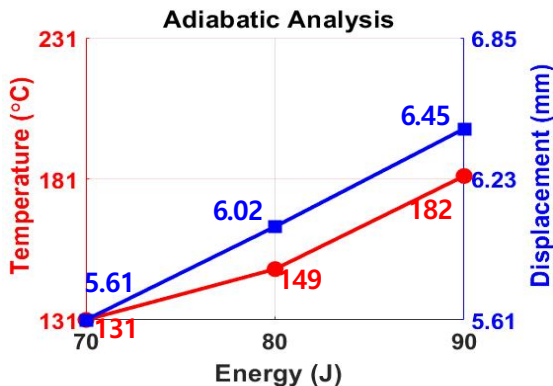


Fig. 4 The maximum temperature and displacement according to impact energy

3.2 펀치 직경의 영향

펀치의 직경에 따라 시편에 접촉하는 면적이 달라지므로 최대온도 및 최대변위가 달라질 수 있다. 펀치의 직경이 변하면 질량이 달라지므로 90J의 에너지가 발생하도록 초기속도를 조절하였으며, 펀치와 다이의 간극은 2mm로 유지하였다. Fig. 5에 제시된 바와 같이 직경 14mm에서 온도가 231℃까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 주목할 사항은 직경이 작을수록 국부적으로 높은 온도가 발생한다는 것이다. 또한 직경이 작을수록 최대온도가 발생하는 시간이 증가하는데 Fig. 6에서 보는 바와 같이 접촉되는 면적이 줄어들어 따라 변형량이 증가하면서 최대온도가 발생하는 시간도 증가하는 것이다.

따라서 단열 블랭킹에서 절단면에 소성변형을 최소화할 수 있는 펀치의 구조를 고안하며, 전단밴드의 형상을 제어하는 것이 필요하다.

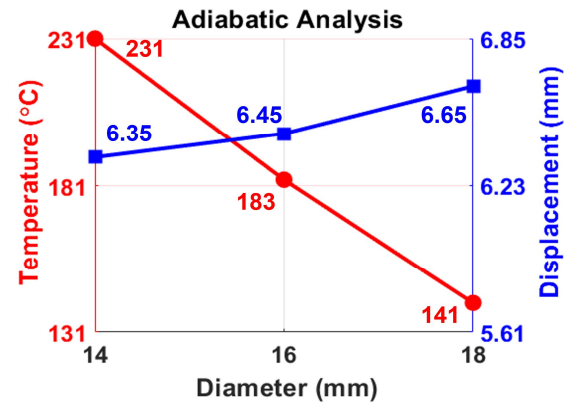


Fig. 5 The maximum temperature and displacement according to punch diameter

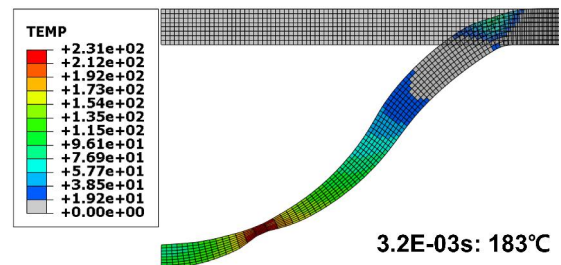


Fig. 6 Temperature for 14mm diameter on the specimen

3.3 펀치와 다이 간극의 영향

단열 블랭킹에서 펀치와 다이 사이 간극은 전단 밴드의 S형상에 영향을 미치므로 간극에 관한 영향을 분석할 필요가 있다. 간극은 1mm, 2mm, 3mm로 설정하였으며 해당 결과가 Fig. 7에 제시되어 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 1mm와 3mm의 간극보다 2mm의 간극에서 온도가 더 높게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 펀치, 다이의 형상등 다양한 요인에 의해 결정되는 것으로 간극이 좁다고 해서 그리고 최대변위가 증가한다고 해서 무조건 온도상승이 더 커지는 것은 아님을 알 수 있다. Table 2에는 간극에 따른 소성 변형률이 제시되어 있다. Fig. 7과 Table 2에서 보는 바와 같이 국부적인 소성 변형률이 높아질수록 온도상승이 커지는 것을 확인할 수 있다.

따라서 단열 블랭킹에서 펀치와 다이의 형상, 간극등 소성변형을 높일 수 있는 구조를 설계하는 것이 중요하다.

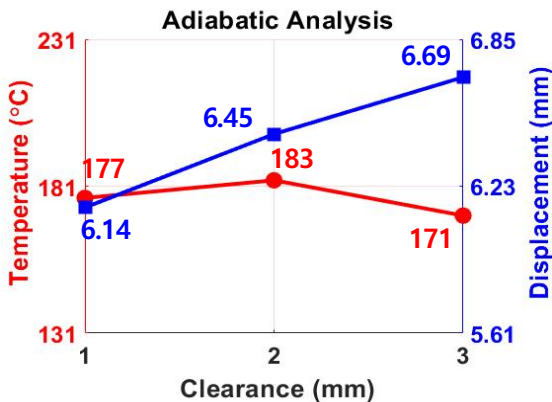


Fig. 7 The maximum temperature and displacement according to punch diameter

Table 2 The maximum plastic strain according to clearance

Clearance [mm]	Plastic strain [.]
1	0.65
2	0.69
3	0.58

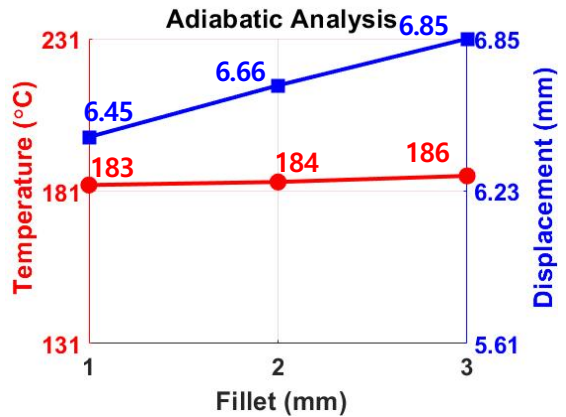


Fig. 8 The maximum temperature and displacement according to fillet

3.4 다이 필렛의 영향

단열 블랭킹에서는 시편과 접하는 다이의 형상을 수직으로 유지하면 절단성능은 향상되지만 다이의 수명은 감소된다. 따라서 다이의 형상이 시편의 온도변화와 변형에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다. 다이의 형상, 즉 필렛을 1mm, 2mm, 3mm로 변경하였을 때 최대온도와 최대변위가 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대온도와 최대변위가 필렛의 크기가 증가할수록 증가하지만 최대온도의 경우 그 변화폭이 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한 필렛이 증가할수록 시편의 변형에 저항 영향이 줄어들어 최대변위가 증가하게 되지만, 소성 변형율의 증가로 이어지지 않음을 확인할 수 있다.

따라서 단열 블랭킹 금형의 경우 수명에 중점을 두어 제작하는 것이 필요하다.

4. 결론

매우 짧은 시간에 소성변형에 의한 열적 연화, 다시 열적 연화에 의한 소성변형이 반복되는 이를 자기 촉매적 순환(auto-catalytic cycle)이라고 하며, 단열 블랭킹의 핵심 메커니즘이다. 단열 블랭킹은 상용 블랭킹 및 정밀 블랭킹에 비해 높은 충격에너지를 생성해야 하므로 고압의 유압실린더가 장착되어야 하는 단점이 있으나 생산성이 높고 표면 품질

이 우수한 장점이 있다. 이러한 장점을 극대화하기 위해 단일 블랭킹에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있으며, 본 연구에서는 판재의 단일 블랭킹에 있어 주요 인자로 작용할 수 있는 충격에너지, 펀치의 직경, 펀치와 다이의 간극, 다이 필렛의 형상 영향을 수치적으로 확인하였다. 이를 위해 기존 문헌에서 제시된 최대온도와 최대변위를 활용하여 해석모델의 신뢰성을 확보하였고, 외연적 시간 적분법을 활용한 유한요소해석을 통해 각 인자의 특성을 확인하였다. 특히 해석모델은 Xia et al.의 연구에서 제안한 시험장비와 동일하게 구성하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 충격에너지가 증가할수록 국부적인 온도상승이 증가하므로, 단일 블랭킹에서 금형의 내구성을 고려하여 충격에너지를 가능한 범위에서 상승시키는 것이 필요하다.
2. 펀치의 직경이 작을수록 국부적으로 온도가 상승하여 단일 블랭킹에 유리하므로 소성변형이 증가하는 펀치구조를 설계하는 것이 필요하다.
3. 펀치와 다이의 간극이 감소함에 따라 무조건 온도상승이 커지는 것은 아니다. 따라서 펀치 및 다이의 형상, 펀치와 다이의 간극, 충격에너지 등 다양한 요인을 고려하여 소성 변형률을 높일 수 있는 구조를 설계하는 것이 필요하다.
4. 다이 필렛에 대한 온도변화는 크지 않음을 확인하였다. 따라서 단일 블랭킹 금형은 수명 향상을 중점으로 설계 및 제작하는 것이 필요하다.

즉, 질량 및 속도 증가를 통해 충격에너지를 향상시켜 소성변형을 증가시킴으로써 국부적인 온도를 높이는 것이 필요하다. 또한 간극과 필렛의 조 절을 통해 소성변형을 극대화할 수 있는 구조를 설계하는 것 역시 반영되어야 한다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 기계장비산업기술개발사업 ‘1.6GPa급 이상 초고강도강 부품 절단용 고속 충격트리밍 프레스개발(과제번호 20014530)’과제 및 한국생산기술연구원의 기관주요사업의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lazzarotto, L., and Michon, R., “Adiabatic Blanking of metal sheets: Technological positioning and industrial developments for production,” 5th Car Body Colloquium, 2008.
2. Landgrebe, D., Barthel, T., and Schiek, F., “TRIMMING OF FLAT AND TUBULAR COMPONENTS BY HIGH SPEED IMPACT CUTTING(HSIC),” Proc. of the ASME 2017 International Engineering Congress and Exposition IMECE2017, 2017.
3. Winter, S., Nestler, M., Galiev, E., Hartmann, F., Psyk, V., and Dix, M., “Adiabatic Blanking: Influence of Clearance, Impact Energy, and Velocity on the Blanked Surface,” Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 5, No. 35, 2021.
4. Cho, J. W., and Han, M. S., “Stress Analysis of Blanking Plate Applied by Press,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Engineers, Vol. 7, No. 2, pp. 66-71, 2008.
5. Abaqus User’s Manual, 2019.
6. Seif, M., Main, J., Weigand, J., Sadek, F., Choe, L., Zhang, C., Gross, J., Luecke, W., and McColskey, D., Temperature-Dependent Material Modeling for Structural Steels: Formulation and Application, NIST Technocal Note 1907, 2016.
7. Xia, P., Palomar, M. S., and Sabirov, L., “adiabatic heating and energy absorption capability of an advanced high strength steel during drop weight impact testing,” Materials Science & Engineering A, Vol. 785, pp. 139382, 2020.