

## 이종마찰용접재의 최적용접조건과 음향방출에 의한 실시간 품질평가

Optimal Welding Condition of Dissimilar Friction Welded  
Materials and Its Real Time Evaluation by Acoustic Emission

공유식<sup>1</sup>, 이진경<sup>2\*</sup>

Yu-Sik Kong<sup>1</sup>, Jin-Kyung Lee<sup>2</sup>

### 〈Abstract〉

In this paper, dissimilar friction welding were produced using 15 mm diameter solid bar in chrome molybdenum steel(SCM440) to stainless steel(STS316L) to investigate their mechanical properties. Consequently, optimal welding conditions were  $n=2000$  rpm,  $HP=70$  MPa,  $UP=140$  MPa,  $HT=10$  sec and  $UT=10$  sec when the metal loss(Mo) is 8.6 mm. In addition, an acoustic emission technique was applied to evaluate the optimal friction welding condition. AE parameters including the cumulative count, amplitude and energy showed a various changes according to the friction condition. A continuous type waveforms and low frequency spectrum was presented in friction time. On the other hand, a burst type waveform and high frequency spectrum was exhibited in pressing time.

*Keywords : Friction Welding, Heating Time(HT), Upsetting Time(UT), Acoustic Emission(AE), AE Parameter*

---

1 부경대학교 기계공학과

1 Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ.

2\* 정회원, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, 조교수 2\* Division of Mechanical, Automobile and Robot Component, Dongeui University.

E-mail: leejink@deu.ac.kr

## 1. 서론

각종 기계부품소재 및 공구류 등의 다양한 분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 마찰용접을 적용하는 연구가 진행되고 있다. 마찰용접(Friction welding)은 기계부품소재 분야에서 제품의 제작에 따른 공정수 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종 접합에 의한 경제성, 신뢰성 높은 제품을 대량 양산하는 등의 접합수단으로 주로 적용되고 있다. 또한 마찰용접의 특성을 효과적으로 활용하고 이종 마찰용접재의 강도특성 평가와 피로수명 향상 방안이 필요한 실정이다.[1-3] 또한 마찰용접은 동종재는 물론 가스용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에서는 적용이 어려운 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성이 있고, 경제적인 측면과 기술적인 측면에서도 많은 장점이 있어 그 이용 범위는 넓고 도입 목적도 광범위하다.[4-6] 이에 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 가압시키는 고상용접으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다.[7,8] 따라서 본 연구에서는 각종 기계부품소재로 사용되는 크롬몰리브덴강(SCM440)과 스테인레스강(STS316L)에 대한 이종 마찰용접을 수행하여 최적화 조건을 실험적으로 규명하고자 한다. 또한 음향방출 기법[9-11]을 이용하여 마찰용접 조건의 변화에 따른 신호의 특성을 평가하고 가열시간 및 업셋시간의 변화에 따른 각종 파라미터를 평가하여 최적의 마찰용접조건을 도출하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 조건

본 연구에 사용된 실험 재료는 기계부품 소재로 사용되는 크롬몰리브덴강(SCM440)과 스테인레스강(STS316L)에 대한 강도와 인성, 내마모성에 중점을 두었다. SCM440은 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, STS316L는 내열성, 내마모성, 고온강도 등이 우수하며, 주된 용도는 기계부품 등의 축류, 볼트류 등에 이용된다. 본 연구에 사용된 재료의 기계적 특성을 Table 1에 나타낸다. 마찰용접 시험편은 좌측의 회전축은 직경 15 mm의 STS316L이며, 우측의 고정축은 직경 15 mm의 SCM440이며, 소재의 길이는 각 150 mm로 적용하였다.

Table 1. Mechanical properties of materials

Material	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Hardness (HV)
SCM440	730	645	17	226
STS316L	710	590	38	178

마찰용접의 변수는 회전축의 회전수(n), 가열압력(HP), 업셋압력(UP), 가열시간(HT), 업셋시간(UT), 재료손실량(Mo) 등이다. 먼저 마찰용접의 압력 조건을 선정하기 위해 마찰용접기의 사용 설명서와 참고문헌[5,6]을 조사하여 Table 2에서와 같이 1단계에서 가열압력을 변화시켜 6가지 조건으로 실험을 수행하였고, 그 결과 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 도출하였다. 그리고 2단계 실험은 가열시간을 2초에서 20초까지 2초 간격으로 10가지 변화를 주어 실험하였으며, 이에 따른

상관관계 등의 변화를 조사하였다. 마찰용접기의 회전축은 스테인레스강(STS316L)을 고정하였고, 고정축은 크롬몰리브덴강(SCM440)을 고정하여 마찰용접을 시행하였다. Table 2의 1단계에서와 같이 가열시간과 업셋시간을 각각 5초, 10초로 적용하였고, 가열압력과 업셋압력을 변화시켜 실험을 수행하였다. 또한 2단계에서 가열시간을 2초에서 20초까지 변화시켜 마찰용접을 수행하여 최적 조건을 규명하고 음향방출에 의한 실시간 품질평가에 대해 고찰하였다.

Table 2. Friction welding conditions and dimension of specimen

Step	n (rpm)	Pressure (MPa)		Time (sec)	
		HP	UP	HT	UT
1	2000	30~80	60~160	5, 10	5, 10
2	2000	70	140	2~20	10

## 2.2 실험장비 및 방법

마찰용접기(TH-25)는 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, Fig. 1과 같이 용량은 최대 재료치수로서 회전축은  $\phi 25$  mm이며, 고정축은  $\phi 40$  mm이다. 그리고 인장강도시험에 사용된 시험기는 만능시험기(KDMT-120)로서, 인장속도는 2 mm/min으로 하였고, 모재와 용접재를 CNC 선반 가공한 후 인장시험을 시행하였다.[1] 한편 음향방출기법을 이용하여 마찰용접 특성을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 시험 시스템을 구성하였다.

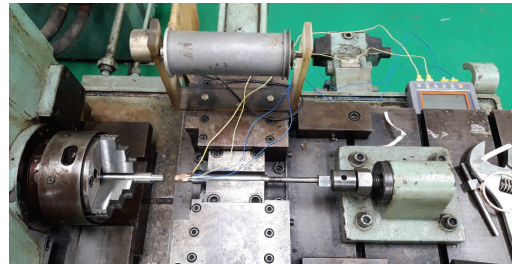


Fig. 1 Friction welding machine

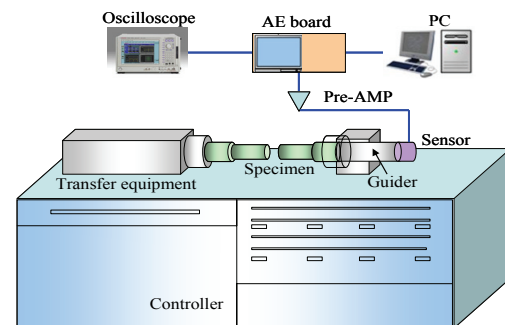


Fig. 2 Schematic diagram of AE technique

그림에서와 같이 마찰용접기의 한쪽에 시험편과 연결된 가이드를 이용하여 음향방출 센서를 부착하였다. 사용된 센서는 광대역 센서(100 kHz-1200 kHz)를 사용하였으며 수신된 신호는 프리앰프에서 40 dB 증폭되어 음향방출 시스템(PCI2)에서 분석되어진다. 또한 외부의 노이즈를 제거하기 위하여 문턱전압값(threshold)은 45 dB로 높게 설정하였다.[9-11]

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 마찰용접 조건의 최적화

Fig. 3은 Table 2의 1단계에서 압력변화에 따른 인장강도의 실험 결과를 나타낸다. 먼저 가열

시간(HT)과 업셋시간(UT)을 각각 5초, 10초로 변화하고, 가열압력(HP)과 업셋압력(UP)을 변화시켜 마찰용접을 수행하였다. 그래프에서와 같이 HP(UP)=30(60), 40(80) MPa의 인장강도는 654, 632 MPa로 비교적 낮게 나타났다. 반면에 HP=50, 60, 70, 80 MPa의 인장시험 결과는 STS316L 모재의 인장강도(710 MPa)와 비슷하게 나타났다. 특히 HP(UP)=50(100), 70(140) MPa의 인장강도가 695, 698 MPa로 나타났으며, HP(UP)=80(160) MPa의 인장강도는 691 MPa로 낮아지는 경향으로 나타났다. 또한 HP(UP)=50(100), 70(140) MPa의 항복강도가 535, 550 MPa로 나타났으며, 특히 HP(UP)=70(140) MPa의 항복강도 결과는 STS316L 모재의 항복강도(590 MPa)에 비해 낮게 나타났다. 파단양상은 STS316L의 열영향부에서 대부분 파단되었다. Fig. 4는 마찰용접에서 가열시간에 따른 재료손실량의 실험 결과를 나타낸다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할수록 재료손실량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 타의 실험 결과에서도 일반적으로 가열시간(또는 가열압력)과 재료손실량과의 사이에는 선형적인 관계를 나타내는 결과가 보고[2,3]되고 있다. 한편, 재료손실량은 2초에서 1.9 mm, 10초에서 8.6 mm로 나타났고, 20초일 때 16.9 mm로 나타났으며, 가열시

간에 따른 재료손실량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 직경 20 mm 강재의 재료손실량은 10~15 mm로 보고[5,6]되는 점을 감안하면, 직경 15 mm 강재에서 16.9 mm의 재료손실량은 비교적 손실량이 많으며, 따라서 16초 이상은 과잉 조건으로 판단된다. Fig. 5는 가열시간에 따른 인장강도 및 항복강도의 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 인장강도는 STS316L 모재의 인장강도(710 MPa)에 거의 비슷한 결과로 나타났으며, 가열시간 2초는 699 MPa, 10초는 696 MPa 정도로 모든 조건에서 거의 일정하게 나타났으나, 14초에서부터는 인장강도가 다소 낮아지는 경향으로 677 MPa 나타났다. 특히 가열시간이 20초일 때 673 MPa로 가장 낮게 나타났다. 그리고 항복강도(STS316L 모재의 항복강도 590 MPa)는 인장강도 결과와 비슷한 경향으로 나타났으나, 가열시간 2초는 593 MPa로 가장 높게 나타났고, 10초는 531 MPa, 14초에서부터는 항복강도가 낮아지는 경향으로 511 MPa 나타났다. 또한 20초는 505 MPa로 가장 낮게 나타났다. 결과적으로 최적 마찰용접의 가열시간은 8초에서 12초 사이로 판단된다. 이는 가열시간 14초 이상은 인장강도 및 항복강도가 낮아지고 재료손실량이 많기 때문에 적합하지 않은 조건으로 판단된다.

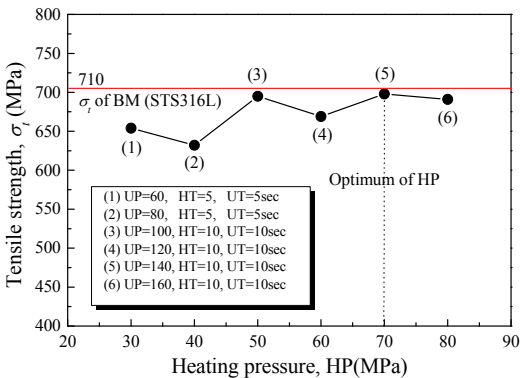


Fig. 3 Relationship between tensile strength and pressure of as-welded specimens

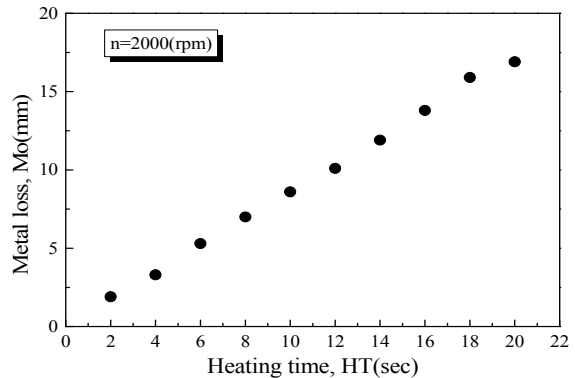


Fig. 4 Relationship between metal loss and heating time of as-welded specimens

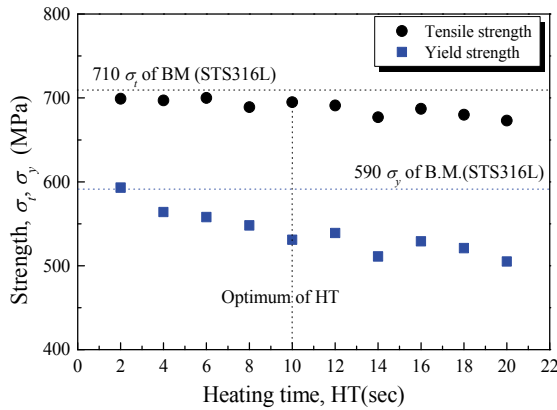


Fig. 5 Relationship between strength and heating time in the as-welded specimens

Fig. 6은 가열시간과 연성의 실험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 가열시간이 2초와 10초까지는 연신율 8 % 정도로 SCM440 모재의 연신율(17 %)에 비해 낮은 결과로 나타났다. 또한 가열시간이 12초 이상에서는 연신율이 6 % 이하로 낮아지는 경향으로 나타났고, 파단면 또한 모재와 같이 전형적인 연성파단 형상으로 나타났다. 또한 단면수축율은 2초에서 15 %, 10초에서 27 %로 가장 높게 나타났고, 12초부터 낮아지는 경향으로 나타났고 20초에서 23 %로 나타났다. 따라서 강도 및 연성적인 측면에서 최적 가열시간은 10초가 적합하다고 판단되며, 14초는 10초와

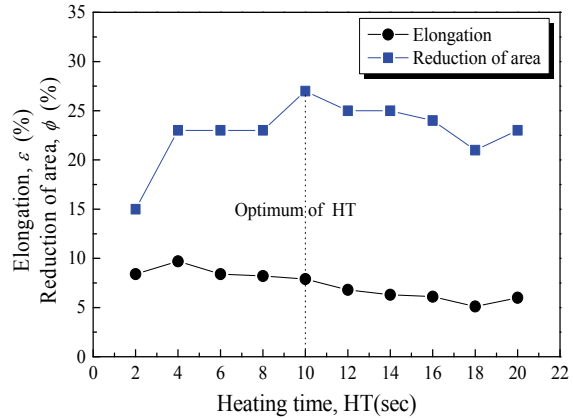
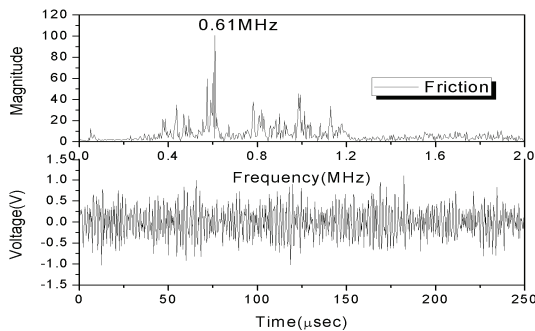


Fig. 6 Relationship between ductility and heating time in the as-welded specimens

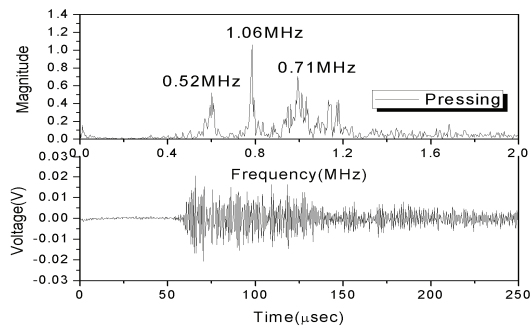
12초에 비해 재료손실량이 많고, 연신율과 단면수축율이 낮아지기 때문이다.

### 3.2 음향방출 특성

본 연구에서는 다양한 마찰용접 조건에서 용접된 이종재료 시험편에 대하여 음향방출기법을 이용하여 최적의 마찰용접조건을 도출하기 위해 음향방출 파라미터를 분석하고자 하였다. Fig. 7에서는 가열시간(HT)과 업셋시간(UT)에 발생하는 음향방출 신호의 전형적인 파형과 주파수 특성을 나타



(a) Heating time



(b) Upsetting time

Fig. 7 Typical waveforms at the heating and the upsetting times

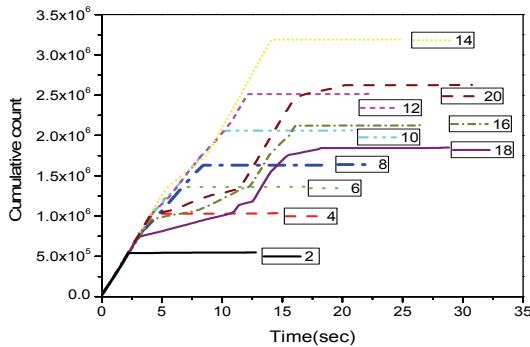


Fig. 8 Cumulative count according to heating times

낸 것으로 가열시간에 발생하는 신호의 파형은 진폭이 매우 높은 연속형의 신호가 발생하고 있으며 0.64MHz 대역의 낮은 주파수 특성을 나타내고 있다. 그러나 가압시간에 발생하는 신호는 진폭은 아주 낮은 신호이지만 돌발형의 신호가 발생하고 있으며 1.06MHz의 높은 주파수 대역을 나타내었다. 이와 같이 마찰에 의한 신호와 가압시 재료의 급격한 성형에 의한 신호는 완전히 다른 파형과 주파수 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. Fig. 8에서는 가열시간을 2초부터 20초까지 변화시키면서 발생한 음향방출 신호의 카운터를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 2초의 가열시간에서는 약 500000개의 카운터가 시간에 따라 선형적으로 발생하고 그 이후 10초 동안 압력이 가해지는 시간동안은 거의 카운터는 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 가열시간이 4초, 6초, 8초 등 14초까지는 증가함에 따라 선형적으로 증가하여 14초에서는 약 3200000개 정도의 카운터를 보이고 있으며 압력시간에는 거의 증가하지 않는 경향을 나타내었다. 그러나 가열시간이 16초, 18초 및 20초에서는 14초의 가열시간에 비하여 카운터의 수가 적게 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 마찰시 재료의 용융에 의한 영향 및 마찰시 압력에 의한 변형 등의 영향에 의해 카운터의 변화가 크게 발생하는 것으로

사료된다.

Fig. 9에서는 가열시간 및 업셋시간에 발생하는 음향방출 신호의 진폭을 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 14초까지의 가열시간 조건의 시험편에서 발생하는 신호의 진폭은 초기 마찰에서는 약 80dB정도의 진폭을 나타내었지만 가열시간이 증가함에 따라 진폭은 조금씩 증가하여 약 5초정도 까지는 85dB 정도의 진폭을 나타내었다 그리고 약 10초 이상의 가열시간에서는 다시 진폭이 감소하여 80dB 정도로 감소함을 알 수 있다. 그리고 업셋시간에서는 45dB~60dB의 낮은 진폭을 나타내는 신호가 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞의 Fig. 7에서 전형적인 파형의 진폭을 나타낸 것과 같은 결과를 보여주고 있다. 그러나 20초의 가열시간을 가진 시험편에서는 가열시간에 발생한 음향방출 신호의 진폭의 변화가 급격하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 가열시간 동안 마찰에 의한 재료의 급격한 성형이 발생하고 성형의 변화에 따라 음향방출 신호의 각종 파라미터도 함께 변화하고 있음을 보여준다.

Fig. 10에서는 마찰용접 시간에 발생하는 음향방출 신호의 에너지의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 6초, 10초 및 14초의 가열시간 시험편에서는 마찰이 시작되는 초기에는 아주 낮은 에너지를 나타내는 신호가 발생하지만 시간이 증가함에 따라 점차적으로 에너지는 증가하여 약 5초 정도의 가열시간에서는 약  $2 \times 10^8$  이하의 신호들이 나타남을 알 수 있다. 그러나 5초 이후에는 급격히 에너지가 증가하여  $4 \times 10^8$  이상의 신호가 나타남을 알 수 있다. 이 시간에서는 재료의 큰 변화가 발생하고 있음을 추측할 수 있다. 즉 마찰시 마찰열에 의해 가열된 시험편 표면이 급격히 변화하여 붉은 플라시가 생성됨을 관찰할 수 있었다. 이 시간에서는 재료의 급격한 성형과 마찰에 의한 신호들로서 높은 에너지를 나타

내었다. 그러나 14초의 가열시간에서 알 수 있듯이 10초 가열시간 이후 다시 에너지가 낮은 신호들이 주로 발생하였다. 이 시간에서는 다시 급격한 성형에 의한 것보다는 마찰의 영향을 더 받은 것으로 사료된다. 그리고 업셋시간에 발생하는 신호들은 마찰에 의해 발생하는 신호에 비하여 아주 낮은 에너지의 분포를 나타내었다. 그리고 20초의 가열시간에서는 약 5초마다 에너지의 분포가 확연히 변화하는 경향을 나타내어 마찰에 의한 변형 형태가 일정하게 변화하는 것이 아니라 일정시간 마찰과 성형이 주기적으로 변화하면서 접합이 완성됨을 예상할 수 있다.

#### 4. 결론

기계부품 소재용 이종 마찰용접 최적용접 조건 및 음향방출 시험 평가에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마찰 용접재의 강도 등 기계적 특성을 고려한 최적조건은 회전수 2000 rpm, 가열압력 70 MPa, 업셋압력 140 MPa, 가열시간 10 sec, 업셋시간 10 sec, 재료손실량 8.6 mm의 결과를 얻었다.

(2) 가열시간에서 발생하는 신호는 연속형의 진폭이 높은 신호와 0.61MHz 정도의 낮은 주파수를 나타내었지만 가압시간에 발생하는 음향방출 신호는 돌발형의 신호 및 1.00MHz 이상의 주파수 특성을 나타내었다.

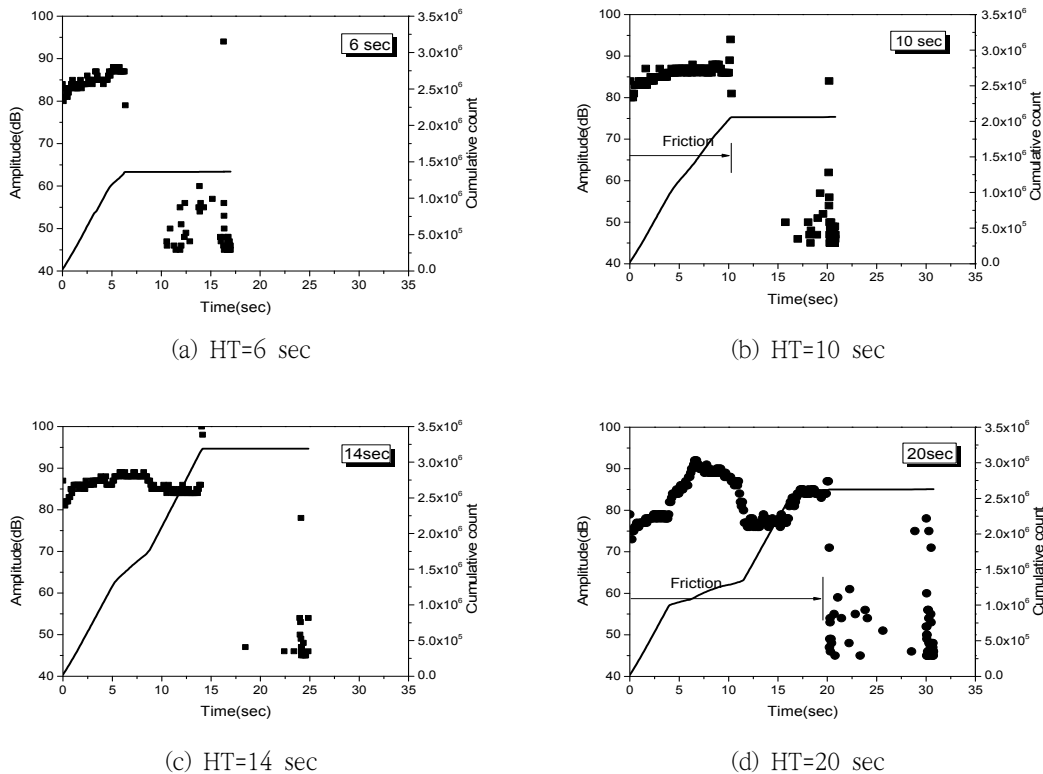


Fig. 9 Amplitude according to heating times

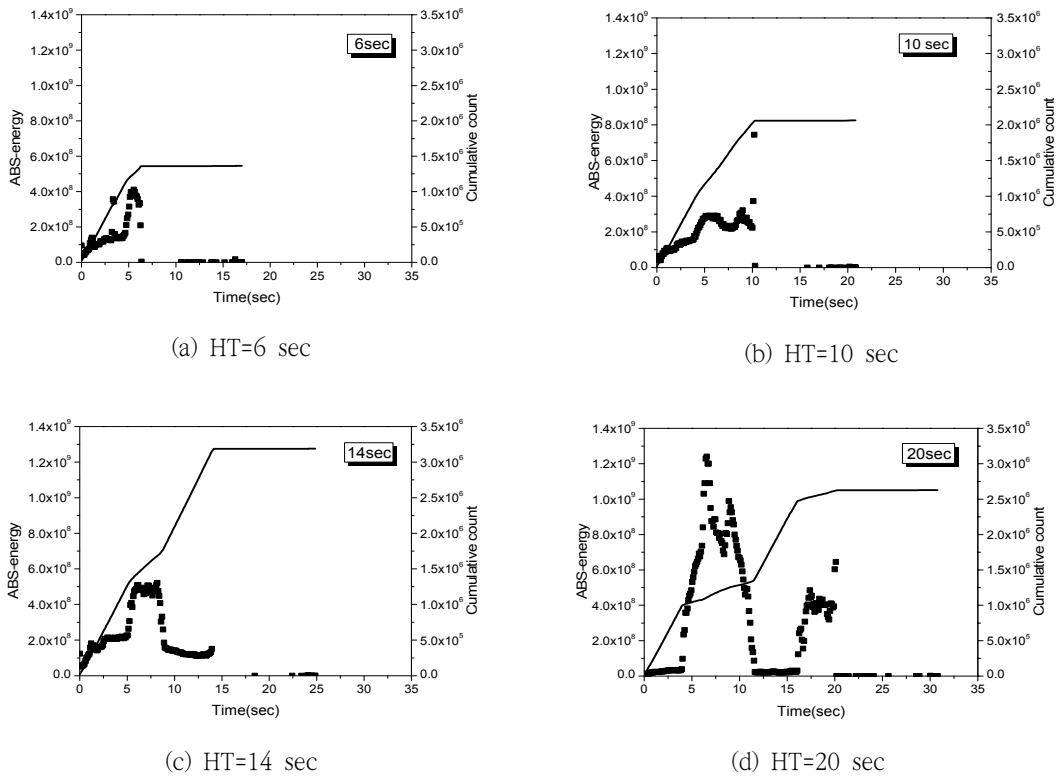


Fig. 10 ABS energy according to heating times

(3) 음향방출 특성에서 가열시간이 14초까지인 시험편에서는 가열시간이 증가함에 따라 카운터의 수도 선형적으로 증가하고 약 80dB의 진폭 및 약  $2 \times 10^8$  이하의 에너지를 나타내는 신호들이 발생하며, 그 이상의 마찰시간에서는 축적된 카운터의 수는 감소하며, 60dB 이하의 진폭 및  $4 \times 10^8$  이상의 매우 높은 에너지를 나타내는 신호가 발생하므로 각 영역에서 신호분석을 통해 용접조건을 도출할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] D. G. Kim, Y. S. Kong and J. K. Lee, "Evaluation of acoustic emission technique for dissimilar friction welding of forgings and pipes," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 38, no. 6, pp. 361-366, (2018).
- [2] L. Wenya and W. Feifan, "Modeling of continuous drive friction welding of mild steel," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 5921-5926, (2011).
- [3] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, "Advances in friction welding process: a review," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 7, pp. 534-558, (2010).
- [4] C. Mary and M. Jahazi, "Linear friction welding



- of IN718 process optimization and microstructure evolution,” *Advanced Materials Research*, vol. 15-17, pp 357-362, (2006).
- [5] W. T. Jeong, Y. S. Kong and S. J. Kim, “The mechanical properties and the non-destructive evaluation of dissimilar friction welded steel bars,” *The Korea Society for Power System Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 77-82, (2006).
- [6] S. K. Oh, H. G. Jang and J. H. Jang, “Optimization of friction welding and its real time evaluation by AE in Cr-Mo steel,” *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 15, no. 4, pp. 511-519, (1995).
- [7] S. M. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole and X. Cao, “Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, pp. 6064-6075, (2010).
- [8] G. S. Chander, G. M. Reddy and A. V. Rao, “Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds,” *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 19, no. 10, pp. 64-73, (2012).
- [9] Zhe Geng, Debashis Puhon, Tom Reddyhoff, “Using acoustic emission to characterize friction and wear in dry sliding steel contacts”, *Tribology International*, In press, (2019).
- [10] Mao Sheng, Shouceng Tian, Bo Zhang, Hongkui Ge, “Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 115, pp. 137-144, (2019).
- [11] R. Rajashekar, B. M. Rajaprakash, “Development of a model for friction stir weld quality assessment using machine vision and acoustic emission techniques,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 229, pp. 265-274, (2016).