

해양차량 경량화용 마그네슘합금의 마찰용접 및 AE 특성

공유식* · 이진경** · 강대민***

*부경대학교 BEST센터

**동의대학교 기계공학과

***부경대학교 기계공학과

Friction Welding and AE Characteristics of Magnesium Alloy for Lightweight Ocean Vehicle

Yu-Sik Kong*, Jin-Kyung Lee** and Dae-Min Kang***

*Bukyong Education Center for Vehicle Safety Component Technology, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Donggeui University, Busan, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Friction welding 마찰용접, Base metal (BM) 모재, Heat affected zone (HAZ) 열영향부, Welding condition 용접조건, Mg alloy 마그네슘합금, AE count 음향방출 카운터, Energy 에너지

ABSTRACT: In this paper, friction welded joints were constructed to investigate the mechanical properties of welded 15-mm diameter solid bars of Mg alloy (AZ31B). The main friction welding parameters were selected to endure reliable quality welds on the basis of visual examination, tensile tests, impact energy test, Vickers hardness surveys of the bonds in the area and heat affected zone (HAZ), and macrostructure investigations. The study reached the following conclusions. The tensile strength of the friction welded materials (271 MPa) was increased to about 100 % of the AZ31B base metal (274 MPa) under the condition of a heating time of 1 s. The metal loss increased linearly with an increase in the heating time. The following optimal friction welding conditions were determined: rotating speed (n) = 2000 rpm, heating pressure (HP) = 35 MPa, upsetting pressure (UP) = 70 MPa, heating time (HT) = 1 s, and upsetting time (UT) = 5 s, for a metal loss (M_o) of 10.2 mm. The hardness distribution of the base metal (BM) showed HV55. All of the BM parts showed levels of hardness that were approximately similar to friction welded materials. The weld interface of the friction welded parts was strongly mixed, which showed a well-combined structure of macro-particles without particle growth or any defects. In addition, an acoustic emission (AE) technique was applied to derive the optimum condition for friction welding the Mg alloy nondestructively. The AE count and energy parameters were useful for evaluating the relationship between the tensile strength and AE parameters based on the friction welding conditions.

1. 서 론

마그네슘 합금은 탁월한 경량성을 가지고 있고 비강도가 매우 우수하다. 그리고 뛰어난 기계가공성, 전자파차폐 특성을 가지므로 수송기계 및 휴대용 부품 관련 산업에 해외에서는 이미 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다. 마그네슘의 경량성은 매우 높아 알루미늄 대비 32%의 중량감소효과를 볼 수 있다. 그리고 현재 가격 면에서 마그네슘은 알루미늄 대비 23%가 높다(강민철, 2003). 하지만 밀도에 대한 부피차이를 고려할 때 알루미늄에 비해 가격 경쟁력 또한 있다고 판단 할 수 있다. 특히 해저 및 항만의 해양차량부품, 전기기계, 기계부품 등의 분야에 사용되는 여러 강재들 중 많은 종류가 탄소당량이 높고 용접성이 좋지 않기 때문에 기존의 용접방법으로는 양호한 용접부 성능을 얻기 어렵다. 이는 국내의 마그네슘합금에 의한 자동차 부품 제

조기술은 선진국에 비해 초보적인 수준에 있다.

마그네슘의 고유특성에 대한 연구와 부가기술이 잘 개발 되어있지 않기 때문이다. 특히 마찰용접을 이용한 자동차 부품 제조기술에 마그네슘 합금을 접목한 경우가 없다고 해도 과언이 아니다. 마그네슘 합금의 고유특성에 대한 연구 및 부가기술과 동시에 마찰용접특성을 평가하는데 있어서 제품의 안전성 및 신뢰도 확보를 위해 마찰용접조건과 인장강도에 대한 상관성 등의 다양한 연구가 필요하다(신형섭 등, 2011; 최상원, 2008).

해양차량 경량화용 부품으로 조향축(Steering column), 로커 암(Rocker arm), 밸브(Valve) 등은 그 용도에서 품질 신뢰성이 높은 단조 등의 소성가공에 의해 제조되는 것이 일반적이다. 조향축의 끝단은 요크(York)형상으로 되어있는데 이러한 복잡한 형상품을 모두 단조에 의해 가공할 경우에는 다수의 단조공정을 필요로 한다. 이는 요크 부분을 종래에는 플래시(Flash)용접을

교신저자 이진경: 부산광역시 부산진구 업광로 995, 051-890-1663 leejink@deu.ac.kr

본 연구는 2011년 대전에서 개최된 한국해양공학회 추계학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

하였으나, 현재 마찰용접을 도입하고 있는 실정이다.

용접기 자체에서 각 소재의 최적의 물성적인 특성을 얻기 위해서는 각각에 맞는 마찰용접조건이 필요한데 본 연구는 해양 차량 경량화를 위한 재료로 마그네슘 합금을 채택하여 이에 따른 마찰용접계의 최적의 물성적인 특성을 얻을 수 있는 조건에 대해 고찰하고자 한다. 마그네슘 합금의 자동차부품 제조기술 개발과 부품양산은 마그네슘 합금의 경량화, 높은 진동흡수성 이점과 마찰용접공정에 따른 많은 이점을 동시에 얻을 수 있다.

따라서 본 연구는 해양차량용 경량화를 위한 마그네슘 합금(AZ31B)의 마찰용접변수인 회전속도, 마찰압력, 가열시간, 업셋압력, 업셋시간에서 압력조건 또는 가열시간을 변화시켜 마찰용접을 시행하였다. 이는 용접변수 변화에 따른 인장강도 및 연성변화의 상관성을 공유식 등(2010-B)의 논문에서 1차적으로 고찰하였다. 이어서 마찰용접부의 충격흡수에너지, 경도분포 및 조직검사 등을 추가 실험을 수행하였다. 또한 마그네슘 합금의 마찰용접에 대한 최적의 마찰용접조건을 비파괴 기법에 의해 평가하고자 음향방출기법을 적용하였으며, 다양한 음향방출 파라미터들과 재료의 기계적 특성과의 연관성에 대해 규명하였다. 이는 마찰접합 품질을 평가하여 해양차량 경량화용 마그네슘 합금 부품생산에 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

Table 1과 Table 2에 본 연구에 사용한 AZ31B의 그 화학 성분과 기계적 성질을 각각 나타낸다. 마그네슘 합금 중 하나인 AZ31B는 성형성 및 강도가 우수하고 내식성이 뛰어나 주로 압출재나 압연재 등으로 가공되어 시판되고 있다.

두 이종재료를 각각 직경 20mm, 길이 100mm로 가공하였으며, 마찰용접 후 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상과 치수는 KS B0801 14A 규격에 따라 CNC선반 가공 후 연삭하였다. 그리고 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접계면에서 좌우 15mm로 절단하였고, 중심부를 따라서 와이어 절단하였다. 절단시 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱하여 미시조직과 미소 비커스경도치를 측정하였다.

Table 1 Chemical compositions of material (wt. %)

Material	Al	Zn	Mn	Si	Mg
AZ31B	3.08	0.97	0.36	0.19	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area ϕ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness (HV)
AZ31B	274	182	29	16	55

2.2 실험장치 및 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기(Model : TOHO TH-25)는

연속구동드레이크형(Continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25\text{mm}$ 이고 고정축은 $\phi 40\text{mm}$ 이다. 그리고 이음부의 인장강도 시험에 사용된 시험기는 만능시험기 (Model : KDU-50)로서 인장속도는 2mm/min으로 각 모재와 용접재를 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model : MVK-H11, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 5g/10초의 0.5mm 등간격으로 경도분포를 조사하였다. 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(Heating pressure, UP), 업셋압력(Upsetting pressure, UP), 마찰가열시간(Heating time, HT), 업셋시간(Upsetting time, UT) 등이다. 1단계 실험에서는 압력조건을 변화시켜서 마찰용접시험의 강도 특성과 재료 손실량(M_o) 및 연성 특성을 검토하여 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정한다. 그리고 2단계에서는 1단계의 최적압력조건을 기준으로 가열시간을 변화시켜 강도 특성 등의 결과에 대해 고찰하였다.

그리고 비파괴기법을 이용하여 최적의 마찰용접조건을 도출하기 위하여 마찰용접 중 발생하는 음향방출 신호를 수신하였고 각각의 용접조건과 음향방출 파라미터와의 상관관계에 대하여 고찰하였다(Susic and Grabec, 2000; Ferrer et al., 2002). Fig. 1에서는 음향방출을 이용한 시험편의 마찰용접에 대한 시험개요도를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 오른쪽 시험편의 한쪽에 가이드(Guided)를 부착하고 가이드 끝쪽에 음향방출 센서를 부착하였다. 이때 시험편과 가이드 및 가이드와 센서 사이에는 진공용 커플러트를 사용하여 마찰시 발생하는 신호를 센서가 모두 수신하도록 하였다. 그리고 수신된 신호는 분석하는데 아주 미약하기 때문에 프리앰프에서 40dB 증폭하여 음향방출 시스템으로 전송하게 된다. 이때 음향방출 시스템에서는 마찰로부터 발생하는 신호를 다양한 음향방출 파라미터를 이용하여 분석하게 되며 마찰조건에 따른 파라미터의 변화를 분리하여 최적의 음향방출 파라미터를 도출하게 된다. 또한 디지털 오실로스코프를 이용하여 마찰용접시 발생하는 파형을 분석하였다. 본 연구에 사용되어진 센서는 광대역 센서를 사용하였으며 주위의 전기적, 기계적 노이즈를 제거하게 위하여 문턱 전압값은 25dB로 고정하였다.

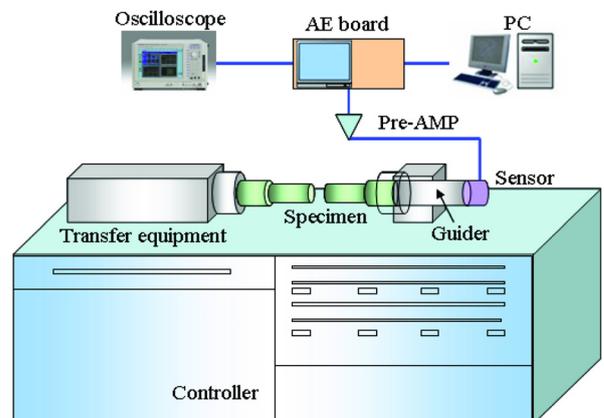


Fig. 1 Schematic diagram on friction weld of AZ31B material using AE technique

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰용접의 최적화

Fig. 2는 마찰용접에서 압력변화에 따른 재료손실량(M_0)과 가열압력(HP)과 압셋압력(UP)의 상관관계를 나타내고 있다. 이 때 가열시간(HT)과 압셋시간(UT)은 각각 1, 5sec로 하였다. 그래프에서 보면 가열압력과 압셋압력이 증가할수록 재료손실량이 증가함을 알 수 있다. 타의 실험결과에서도 일반적으로 가열압력과 재료손실량의 사이에는 선형적인 증가 관계를 나타내는 결과가 많이 보고(오세규 등, 1988; Jeong and Shinoda, 1997; Kang and Min, 1988)되고 있다.

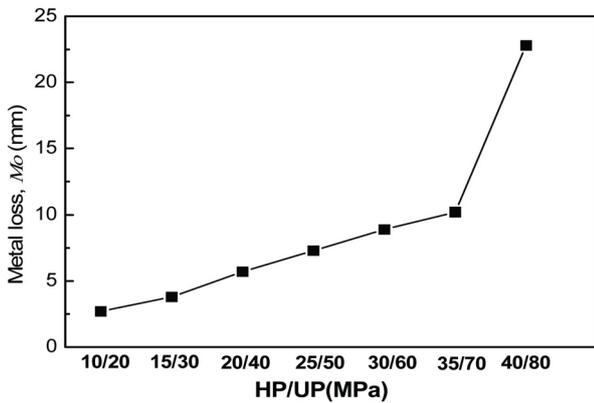


Fig. 2 Relationship between metal loss and welding pressures in the friction welded AZ31B

그래프에서와 같이 가열압력(HP)과 압셋압력(UP)이 각각 10, 20MPa일 때, 재료손실량은 2.7mm로 나타났고, 35, 70MPa일 때 10.2mm로 나타났으나, 40, 80MPa일 때 22.8mm로 두 배 이상 재료손실량이 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 인장강도가 260MPa로 35, 70MPa의 압력조건의 인장강도 271MPa에 비해 약 10MPa 이상의 값이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 22.8mm의 재료손실량은 과잉 압력조건에 따른 결과일 것으로 판단된다(공유식 등, 2010-B).

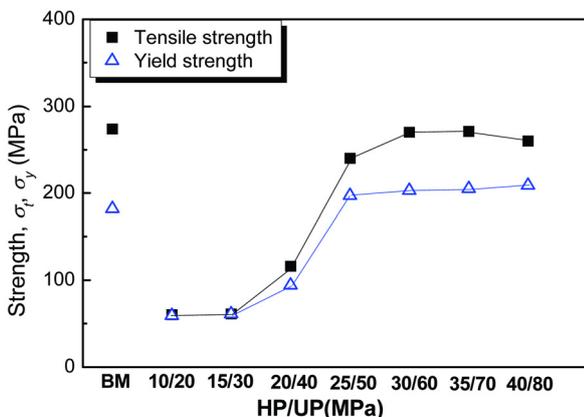


Fig. 3 Relationship between tensile strength and heating pressures in the friction welded AZ31B

Fig. 3은 압력변화에 따른 인장강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 압셋압력(UP)을 모든 조건에서 가열압력(HP)의 2배의 압력으로 수행하였다. 먼저 가열압력(HP)과 압셋압력(UP), 가열시간(HT)과 압셋시간(UT)을 각 4가지 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그림에서 보면 타 조건에 비해 $HP=35MPa$, $UP=70MPa$, $HT=1sec$, $UT=5sec$ 의 인장강도가 271MPa로 가장 높게 나타났다. 이는 모재의 인장강도(274MPa)의 100%에 도달하는 결과이다. 또한 이 결과치는 타 문헌(공유식 등, 2010-A; 오세규 등, 1988; 이배섭 등, 2005; Kong and Kim, 2006)의 결과와도 일치한다. 따라서 압력변화에 따른 강도적인 측면에서 고려할 때 최적조건은 HP 와 UP 를 각각 35, 70(MPa), HT 와 UT 를 각각 1, 5sec로 하는 것이 적합하다고 판단된다(공유식 등, 2010-B).

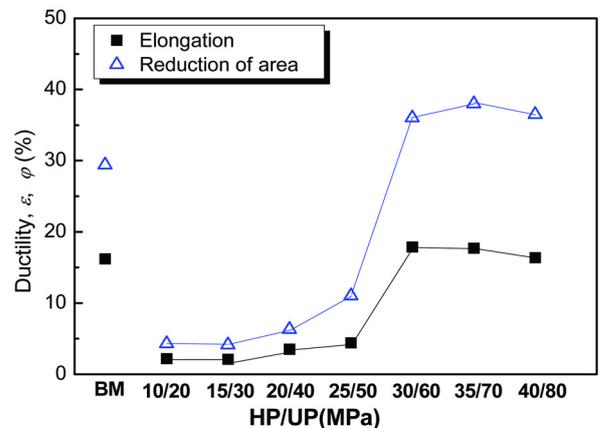


Fig. 4 Relationship between ductility and heating pressures in the friction welded AZ31B

Fig. 4는 압력변화와 연성(연신율, 단면수축률)과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 압력조건에 따라서 연신율과 단면수축률의 결과의 차이가 확연히 구분되어 나타나고 있다. $HP=35MPa$, $UP=70MPa$ 일 때 연신율은 약 17.7%로 AZ31B 모재(16.2%)의 결과와 비슷하나 약간 높게 나타났고, 단면수축률은 약 38%로 AZ31B 모재(29.4%)의 결과에 비해 높게 나타났다. 따라서 앞에서 언급한 강도적인 측면과 더불어 최적조건을 연성적인 측면에서 고려해볼 때, 압력조건은 $HP=35MPa$, $UP=70MPa$ 가 적합하다고 판단된다(공유식 등, 2010-B). 이는 마찰용접재의 인장강도가 모재보다 높은 경우 취성의 영향이 적고, 연성이 높은 편이 우수하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 가열시간 변화에 따른 충격에너지 값과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 AZ31B 모재의 충격에너지 값($0.97kg \cdot m$)에 비해 전체적으로 낮게 나타났다. 이와 같이 모재의 경우와 비교해서 샤프트 충격치가 낮게 나타난 것은 충격시험에 대한 노치의 방향이 모재의 경우에는 미시조직에 직교해서 하중이 가해지고, 용접재의 경우에는 미시조직에 평행하게 하중이 작용했기 때문에 낮게 나타난 것으로 사료된다.

마찰용접부의 충격에너지 값은 0.5, 1, 1.5sec일 때 0.62, 0.48, 0.48 $kg \cdot m$ 로 나타났으며, 1, 1.5sec일 때의 값은 AZ31B 모재보다

약 50%에 근접한 결과이다. 이는 충격에너지 등을 고려하여 본 실험조건에서의 최적 가열시간은 1sec가 적합할 것으로 판단된다.

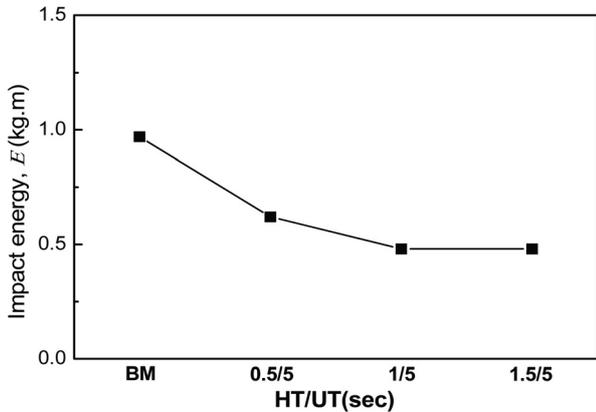


Fig. 5 Relationship between impact energy and welding times in the friction welded AZ31B

3.2 용접부 경도분포 및 조직검사

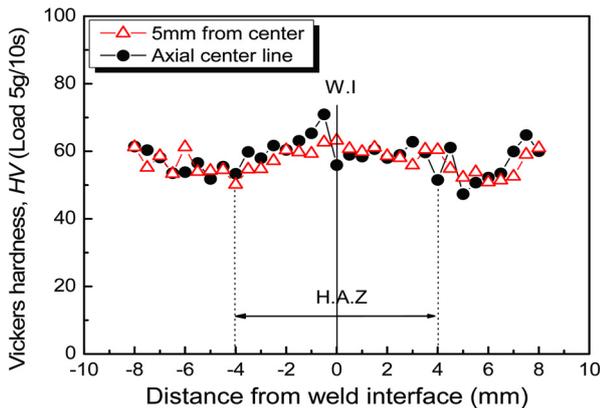


Fig. 6 Micro Vickers hardness distribution of the friction welded AZ31B, Welding conditions: $n=2000$ (rpm), $HP=35$ (MPa), $UP=70$ (MPa), $HT=1$ (sec), $UT=5$ (sec)

Fig. 6은 최적마찰용접 조건($n=2000$ (rpm), $HP=35$ (MPa), $UP=70$ (MPa), $HT=1$ (sec), $UT=5$ (sec))에서 용접한 시험편의 경도 분포를 나타낸다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도시험기(하중 5g, 유지시간 10sec)를 사용하여 중심부에서 좌우 8mm까지 0.5mm 간격으로 조사하였다. 그래프에서 보면 모재의 경도는 HV 55이며, 이들 재료의 용접계면(Weld interface, WI)의 경도는 약 HV 50로서 모재와 비슷하게 나타났다. 이는 용접계면 부근에서 마찰용접시 국부가열과 급랭 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한다는 타 재료의 연구결과와는 차이가 있는 것으로 사료된다(Cho and Suh, 1997). 또한 열영향부는 좌측 4mm+우측 4mm=8mm로 판단된다.

Fig. 7은 최적조건($n=2000$ (rpm), $HP=35$ (MPa), $UP=70$ (MPa), $HT=1$ (sec), $UT=5$ (sec))에서 마찰용접한 시험편의 광학 현미경(OM) 조직을 나타낸다. 에탄올 90ml, 염산 10ml, 15초로 에칭

(Etching)하여, 두 이종재의 용접계면(WI), 열영향부(HAZ) 및 모재부(BM)의 조직을 각각 50배의 배율로 검사하였다.

용접계면(a) 부근에서 두 재료가 강렬히 혼합되어, 계면의 형태가 잘 구분이 되지 않게 나타난다. 이는 마그네슘 합금의 결정립이 재결정하여 더욱 미세화 되었으며, 아주 양호하게 접합되었음을 보여주고 있다. 최적조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직을 관찰한 결과는 재료가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태임을 알 수 있었다. 그러나 마찰용접계면 및 열영향부의 적합한 평가를 위해서는 결정립의 미세화, 가공경화, 금속간 화합물, 변형률완화, 상변태 등이 미세조직이나 경도에 다양하고 복잡한 영향을 미치기 때문에, 화학조성 및 열가공 이력 등에 대한 연구가 차후 더 필요하다고 생각된다.

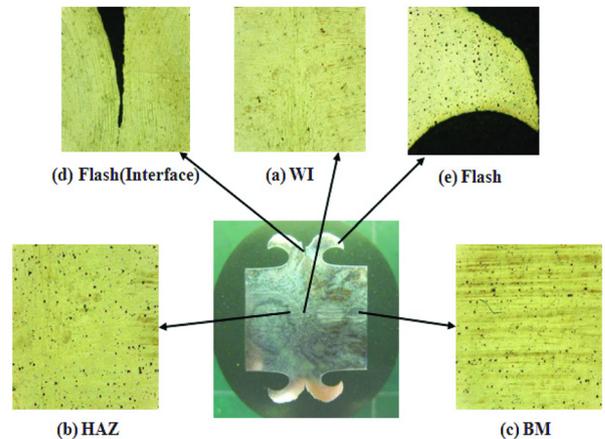


Fig. 7 Macro-structures of BM, HAZ and WI of the friction welded AZ31B(x50), Welding conditions: $n=2000$ (rpm), $HP=35$ (MPa), $UP=70$ (MPa), $HT=1$ (sec), $UT=5$ (sec)

3.3 마찰용접과 AE분석

Fig. 8은 비파괴적 방법으로 마그네슘합금의 최적의 마찰용접 조건을 도출하기 위하여 음향방출 기법을 적용한 결과로써 음향방출 파라미터들 중 카운터를 분석한 결과이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 먼저 각각의 조건에서 HT가 1초동안 다수의 음향방출 신호가 발생하지만 5초의 UT동안에는 신호가 거의 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 업셋시간 동안 급격한 소성거동이 발생하여 다수의 음향방출 신호가 발생할 것으로 사료되어지나 시험편에서 마찰에 의해 발생하는 열과 주위의 노이즈를 제거하기 위한 문턱전압값 때문에 센서에 필터링 되어진 것으로 사료된다. 특히 1초 동안의 가열시간의 마찰에 의해 발생하는 신호에 비하여 업셋시간의 소성거동 발생하는 신호의 크기가 현저히 낮게 발생함을 확인하였다. 따라서 음향방출 기법을 이용하여 마그네슘합금의 최적 마찰용접 조건을 도출하기 위해 업셋시간을 분석하는 것보다 가열시간을 분석하는 것이 더욱 효율적이라는 것을 알 수 있었다. 특히 모든 조건에서 초기 마찰순간에 AE 카운터는 22500정도의 값을 나타내었다. 그러나 다음순간 바로 25000까지 AE 카운터가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있으며 압력조건이 10/20, 15/30, 20/40인 경우에는

점차적으로 AE 카운터가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 25/50, 30/60 그리고 35/70인 압력조건의 시험편에서는 그림에서 보여주는 바와 같이 AE 카운터가 일정하게 발생하는 영역이 관찰되었다. 이러한 결과는 Fig. 3에서와 같이 각 조건에서 인장강도의 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 처음 3조건(10/20, 15/30, 20/40)의 인장강도 시험결과는 압력조건이 25/50, 30/60 그리고 35/70인 경우의 시험편에 비하여 현저히 낮음을 알 수 있었다. 따라서 AE 카운터를 이용하여 마그네슘합금의 최적의 마찰조건을 도출하기 위해서는 업셋시간 보다는 가열시간에서 발생하는 AE 신호의 카운터 중 어떤 영역에서 일정한 카운터가 발생하느냐의 유무에 따라 결정됨을 알 수 있다.

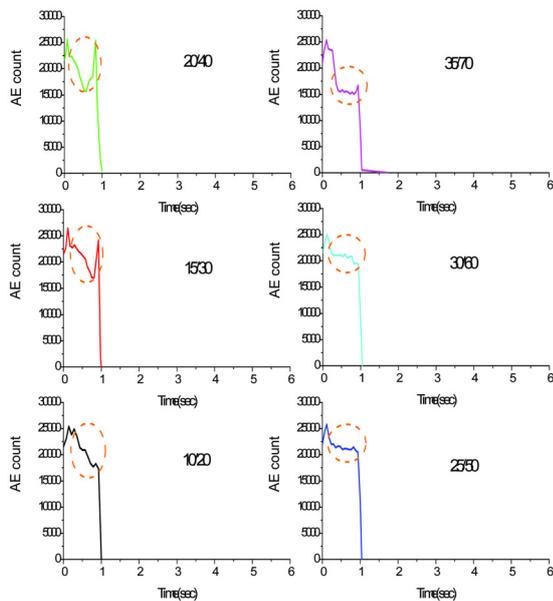


Fig. 8 AE count changes according to the fraction welding conditions

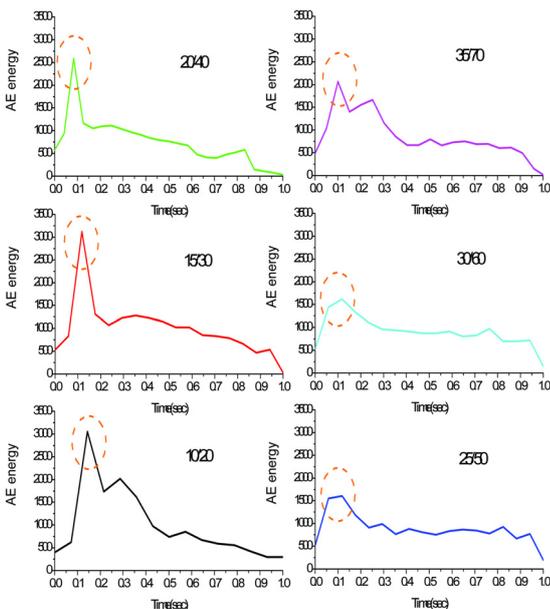


Fig. 9 AE energy changes according to the fraction welding conditions

Fig. 9는 가열시간에서 발생하는 AE 신호의 에너지 변화를 나타낸 것으로 모든 조건의 시험편에서 마찰순간에 발생하는 AE 신호의 에너지는 500내외의 값을 나타낸다. 그러나 0.1초 내외에서 발생하는 신호의 에너지는 10/20, 15/30 그리고 20/40의 압력조건 시험편에서는 2500에서 3000의 범위의 아주 높은 값을 나타내었다. 반면에 25/50, 30/60 그리고 35/70의 압력조건 시험편에서 발생하는 신호의 에너지는 앞의 시험편들보다 훨씬 낮은 1500에서 2000의 값을 나타내었다. 따라서 가열시간에서 가열압력이 낮으면 초기 AE 에너지는 매우 높은 값을 나타내는 신호가 발생하고 가열압력이 25MPa 이상이 되면 에너지의 값이 낮은 신호가 발생하게 되는데 이와 같은 결과는 압력이 높을수록 마찰에 의해 발생하는 열이 증가하고 마찰에 의한 운동에너지가 열에너지로 변환되어 실제 AE 센서에 수신되는 에너지는 감소하는 것으로 사료된다.

이와 같은 결과를 토대로 하여 재료의 기계적 특성중의 하나인 인장강도와 AE 에너지와의 상관관계를 비교해보면 AE신호의 에너지가 2000이상 발생하면 인장강도는 급격히 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 AE 신호의 에너지를 분석함으로써 재료의 인장강도를 어느 정도 추정할 수 있어 마그네슘합금의 최적 마찰조건을 도출하는데 유효한 파라미터인 것으로 나타났다.

4. 결 론

해양차량 경량화용 마그네슘 합금(AZ31B)의 동종재 마찰용접을 수행하여 각 조건별 접합특성 등을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접합조건에 따른 AZ31B재의 강도, 연성 및 인성(충격에너지) 등의 기계적 특성을 고려한 최적의 마찰용접조건을 얻을 수 있었다. 또한 경도분포 및 미세조직을 관찰한 결과는 두 동종재가 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 형성하여 아주 양호하게 접합된 상태임을 알 수 있었다.

(2) AZ31B재의 최적마찰용접 조건을 도출하기 위한 음향방출 적용결과 1초의 가열시간에서 발생하는 AE 신호의 카운터 발생경향을 분석함으로써 재료의 인장강도를 추정할 수 있었으며, 마찰에 의해 발생하는 신호가 2000 이하의 에너지가 되어야 최적의 마찰용접조건이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 결과적으로 AZ31B의 마찰용접 최적화 및 비파괴 시험에 따른 최적화를 규명할 수 있었다. 따라서 마찰용접을 통한 해양차량 경량화용 부품개발(공정수 및 재료 절감 등)의 생산효과가 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

Cho, H.S. and Suh, S.J. (1997). "Friction Welding of Inconel

- 713C and SCM440", *Journal of KWS*, Vol 15, No 6, pp 78-84.
- Ferrer, F., Faure, T., Goudiakas, J. and Andres, E. (2002). "Acoustic Emission Study of Active-passive Transitions During Carbon Steel Erosion-corrosion in Concentrated Sulfuric Acid", *Corrosion Science*, Vol 44 No 7, pp 1529-1540.
- Jeong, H.S. and Shinoda, T. (1997). "Fundamental and Basic Application of Friction Welding", *Journal of KWS*, Vol 15, No 6, pp 1-12.
- Kang, S.B. and Min, T.K. (1988). "A Study on The Friction Weldability of Carbon Steel (S45C) to Aluminum Alloy (A6063)", *Journal of KWS*, Vol 16, No 2, pp 153-220.
- Kong, Y.S. and Kim, S.J. (2006). "Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment", *Trans. of the KSME (A)*, Vol 30, No 4, pp 402-408.
- Susic, E. and Grabec, I. (2000). "Characterization of The grinding Process by Acoustic Emission", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 40 No 2, pp 225-238.
- 강민철 (2003), "한국마그네슘합금산업의 현황과 전망", *부품소재 논문학회지*, pp 32-35.
- 공유식, 윤성필, 김선진 (2010-A). "자동차 후진기어용 축재(SM-45C-SF45)의 이중마찰용접 특성", *대한기계학회논문집 A권*, 제34권, 제1호, pp 85-90.
- 공유식, 천봉근, 강대민 (2010-B). "AZ31 마그네슘합금의 마찰 접합특성", *한국소성가공학회지*, 제19권, 제5호, pp 277-282.
- 신형섭, 정운철, 최광 (2011). "마그네슘합금(AZ31B) 판재의 마찰교반 점용접시 접합특성에 미치는 틀속도의 영향", *대한용접·접합학회지*, 제29권, 제2호, pp 80-87.
- 오세규, 김부안, 김선진, 남상훈 (1988). "S45C와 SCM4의 마찰용접 및 피로특성에 관한 연구", *한국해양공학회지*, 제2권, 제2호, pp 312-321.
- 이배섭, 공유식, 김선진 (2005). "해양차량 속업소비용 강재의 이중 마찰용접과 AE 평가", *한국해양공학회지*, 제19권, 제1호, pp 44-48.
- 최상원 (2008), *자동차 경제; 자동차 경량화 동향*, pp 37-47.

2011년 10월 14일 원고 접수

2011년 11월 25일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정