

# 실험계획법에 의한 AZ31마그네슘합금의 마찰접합시 최적공정설계

강대민<sup>\*#</sup>, 곽재섭<sup>\*\*</sup>, 최종환<sup>\*\*\*</sup>, 박경도<sup>\*\*\*\*</sup>

## Optimization for Friction Welding of AZ31 Mg Alloy by Design of Experiments

Dae-Min Kang<sup>\*#</sup>, Jae-Seob Kwak<sup>\*\*</sup>, Jong-Whan Choi<sup>\*\*\*</sup>, Kyeong-Do Park<sup>\*\*\*\*</sup>

(Received 20 March 2011; received in revised form 26 July 2011; accepted 8 August 2011)

### ABSTRACT

Magnesium alloy has been known as lightweight material in automobile and electronic industry with aluminum alloy, titanium alloy and plastic material. Friction welding is useful to join different kinds of metals and nonferrous metals they are difficult to be joined by such as gas welding, resistance welding and electronic beam welding. In this study, friction welding was performed to investigate optimization process of Mg alloy with a 20mm diameter solid bar. For that, the orthogonal array ( $L_9(3^4)$ ) was used that contained four factors and each factor had three levels. Control factors were heating pressure, heating time, upsetting pressure and upsetting time. Also tensile tests were carried out to measure mechanical properties for welded conditions. The levels of heating pressure and upsetting pressure used were 15, 25, 35MPa, and 30, 50, 70MPa, respectively. In addition those of heating time and upsetting time were 0.5, 1, 1.5 sec and 3, 4, 5 sec., respectively, rotating speed of 2000rpm.

From the experimental results, optimization condition was estimated as follows; heating pressure=35MPa, upsetting pressure=70MPa, heating time=1.5sec, upsetting time=3sec.

**Key Words** : Friction Welding(마찰용접), Magnesium Alloy(마그네슘합금), Process Optimization(최적공정설계), Orthogonal Array Method(직교배열법)

## 1. 서 론

최근 산업과 과학기술의 발전과 함께 지구환경문제

에 관련하여 연비규제가 한층 강화되었고 고유가 상황 역시 지속되고 있어 연비향상기술은 산업체의 경쟁력을 가늠할 수 있는 주요기술로 평가되고 있다. 연비향상은 차량의 경우 엔진출력 향상과 공기저항 감소화 함께 경량화는 연비향상기술로서 가장 주목을 받고 있는 것으로 차량무게를 10%줄이면 연비는 3-8% 개선되는 것으로 알려져 있다<sup>[1]</sup>.

이와 관련하여 마그네슘합금은 탁월한 경량성, 높은 비강도, 우수한 진동 감쇠능, 전자파 차폐능 우수

\* 부경대학교 기계공학과

# 교신저자 : 부경대학교 기계공학과

E-mail : dmkgang@pknu.ac.kr

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* 부경대학교 BEST 선도산업

\*\*\*\* 부경대학교 대학원 생산자동화공학과

등의 특징<sup>[2,3]</sup>을 활용하여 자동차뿐만 아니라 전기/전자 부품, 레저/스포츠분야 군수용품 및 항공기 등 산업계 전반적으로 적용이 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

한편 마찰용접은 재료를 맞대어 가압한 상태에서 상대(회전)운동시켜 접촉부에서 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 방법으로 접합부의 면과 그 근방에서만 열이 발생하므로 에너지 효율이 높고 접합공정 조건의 인자는 간단한 기계적인 양으로서 쉽게 재현이 가능하다. 그리고 접합부에서의 에너지 효율이 높기 때문에 접합부분을 단시간에 가열시켜 접합시킬 수 있고 접합공정 중에 아크 및 연기 등이 발생하지 않기 때문에 작업환경이 양호하기 때문에 기어샤프트, 미션 기어샤프트 등 각종 자동차 부품과 건설중장비 등의 산업기계의 부품에 많이 적용되고 있다<sup>[4]</sup>.

이러한 마찰접합에 관한 연구로는 Jennings<sup>[5]</sup>은 마찰용접에 의해 접합된 이종재의 물성치에 대해서, Lucas<sup>[6]</sup>는 마찰용접에 대한 프로세서 매개변수들에 대해 조사하였다. 또한 Fomichey<sup>[7]</sup>는 고속공구강의 마찰용접에 대해서, Ellis<sup>[8]</sup>는 마찰시간과 공작물직경, 압력 및 길이손실과의 관계 등에 대해 연구하였으나 마그네슘합금에 대한 마찰접합의 연구는 매우 불충분한 실정이다.

본 연구에서는 산업설비나 수송기계부품의 경량화를 위해 AZ31마그네슘합금의 마찰접합시 공정의 최적화를 위해 실험계획법이 이용되었다. 실험적 통계 해석을 위해 스피들의 회전수를 일정하게 하고 가열 압력, 가열시간, 압력 및 압력시간 등의 접합조건에 따른 인장시험결과를 통하여 최적마찰접합조건을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시편

실험에 사용된 AZ31마그네슘 합금의 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1-2에 각각 나타내었다.

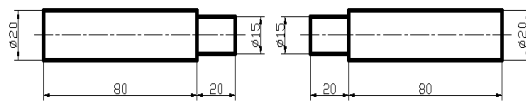
**Table 1 Chemical composition of material(wt. %)**

Material	Al	Zn	Mn	Si	Mg
AZ31	3.08	0.97	0.36	0.19	bal.

**Table 2 Mechanical properties of material**

Material	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Reduction of area (%)	Elongation (%)	Hardness HV
AZ31	274	182	29.4	16.2	55

마찰접합된 인장시편을 만들기 위해 먼저 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 가공하였고 Fig. 2는 마찰 접합된 샘플을 나타낸다. 경계면인 접합부에서 플래시 형상이 우산모양으로 형성되는 것은 압력 증가하면서 접촉부 내부에서 열발생이 급격히 커지기 때문으로 생각된다.

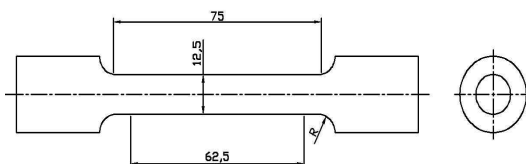


**Fig. 1 Specimen for friction welding**



**Fig. 2 Friction-welded sample**

Fig. 3은 마찰 용접된 재료의 인장시험을 위해 ASTM규격(ASM B 557M)에 따라 CNC 선반가공하여 제작하였다. 여기서 필렛반경 R은 9mm이다.



**Fig. 3 Dimensions of specimen for tensile test**

### 2.2 실험방법 및 조건

마찰용접의 방식에는 브레이크 방식과 플라이휠 방식으로 구분된다. 브레이크 방식에는 한 쪽의 모

재는 고정되고 다른 쪽의 모재는 일정한 회전수로 회전하여 서로 결합되는 방향으로 운동하고 마찰 가압력이 부가되면 접촉부에서 발열된다. 이후 브레이크가 가동되어 회전하고 있던 모재는 정지하여 업셋 압력에 의해 접합되는 방식이다. 반면 플라이휠 방식은 한 쪽의 모재는 플라이휠에 속해져 플라이휠의 회전에 의해 필요한 에너지가 축적되고 다른 쪽의 모재는 회전에 의해 구속된다. 이후 두 모재에 마찰 추력이 부가되어 모재의 접합면은 일정한 압력하에서 서로 마찰되는 방식이나 여기서는 두 재료를 각각 회전축과 고정부에 장착한 다음 회전축을 고정부 방향으로 이동하여 두 재료를 접촉시키면서 발생하는 마찰열 에너지에 의해 접합하는 연속구동 마찰 접합법을 사용하였다. Fig. 4는 회전축을 고정부에 이동하여 두 재료가 접촉된 사진을 나타내고 고정부는 바이스에 의해 고정되었다. 실험에 사용된 마찰접합기는 모델이 TOHO TH-25인 연속구동 브레이크형인 시험기이다.

마찰용접의 최적화를 위해 Table 3과 같은 조건을 지닌 4인자 3수준( $L_9(3^4)$ )의 직교배열법을 사용하였고 Table 4에서 적용된 접합인자와 수준 등을 나타내었다. 실험에 사용된 인자와 수준에 대해서는 우선 회전속도가 너무 낮으면 재료의 고정 및 소재의 파손과 같은 문제가 발생하여 본 실험에서는 2000rpm으로 고정하였다. 압력에 대해서는 너무 낮으면 충분한 발열이 생기기 어렵고, 높으면 국부적으로 고온으로 가열되어 급속히 재료의 축 방향 길이가 짧아지게 되어 본 실험에서는 가열압력의 수준은 15, 25, 35MPa으로 하였고 업셋압력의 수준은 30, 50, 70

MPa으로 하였다. 가열시간이 너무 길면 생산성 저하가 발생하고 재료의 손실이 많아진다. 가열시간이 짧으면 불균일하게 가열됨과 동시에 산화물이 잔류하며 계면상에 접합되지 않은 부분이 생기게 되어 가열시간을 0.5, 1, 1.5sec로 수준을 정하였고 업셋시간의 수준은 3, 4, 5로 정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

마찰용접된 재료의 기계물성치를 측정하기 위해 모델이 KDMT-120T인 만능재료시험기를 이용하여 2mm/min인 인장속도로서 실험을 행하였다. Fig. 5에서 실험후의 시편을 나타내었고 여기서 보면 파단은 재료의 길이에 대한 거의 횡방향으로 발생하였다는 것을 알 수 있다. Table 5에서 직교배열조건에 따른 인장강도결과를 각각 나타내었고 Fig. 6에서 인자들의 수준에 따른 인장강도결과를 나타내었다. 실험결과를 보면 가열압력인 인자 A, 업셋압력인 인자 B, 가열시간인 인자 C 및 업셋시간인 인자 D의 최대 인장강도 값을 지니는 조건은 각각 수준 3, 수준 3, 수준 3 및 수준 1로 나타났다. 결과의 정확성을 부여하기 위하여 행해진 인자들의 분산분석결과는 Table 6에 나타내었다. 이 결과에서 자유도(DF)는 식 (1)에 의하여 구하였다.

$$DF = \text{number of level} - 1 \quad (1)$$

각 인자에 대한 제곱의 합( $SS_i$ )은 다음 식 (2)에 의해 계산하였다.

$$SS_i = \frac{3}{N} [T_1^2(i) + T_2^2(i) + T_3^2(i)] - \frac{T^2}{9} \quad (2)$$

여기서  $i$ 는 적용된 인자 A, B, C 및 D,  $T_1(i)$ ,  $T_2(i)$ ,  $T_3(i)$ 는 각각 수준 1, 수준 2, 수준 3의 값을 나타낸다. 그리고 N는 실험횟수, T는 CF는 자료의 합  $T_1(i) + T_2(i) + T_3(i)$ 을 나타낸다.

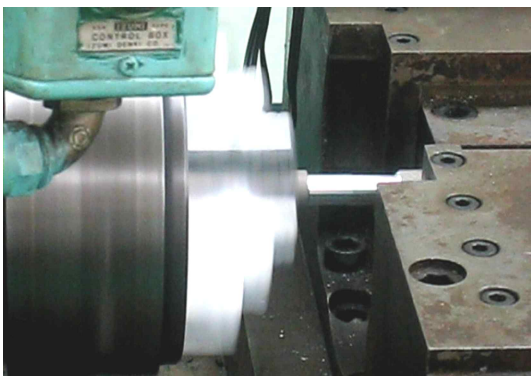


Fig. 4 Contacting of spindle part with fixed part

**Table 3 Orthogonal array(L9(3<sup>4</sup>))**

Experimental No.	Factors			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



**Fig. 5 Tensile specimens after testing**

또한 평균제곱(MS)은 제곱의 합(SS)을 자유도로 나눈 값이고 비율 ( $F_0$ )은 평균제곱의 최소평균제곱과의 비율을 나타낸다. 여기서 인자 D의 평균 제곱 값이 다른 세 인자에 비하여 아주 적은 값으로 나타나 업셋시간이 재료 특성치에 미치는 영향은 매우 작다는 것을 의미한다. 그래서 업셋시간을 오차항으로 분류하여 다시 분산분석을 수행한 결과 마찰접합된 AZ31마그네슘합금의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 업셋압력(53.8%)이고 나머지 인자들은 가열압력(31.9%), 가열시간(13%) 순으로 나타났다.

Fig. 6에 Table 5에 나타낸 조건의 인장강도 측정 결과를 각각의 인자 및 수준별로 표시하였다. 이 결과에서 가장 높은 값을 가지는 조건들의 조합이 최적공정조건을 나타내고 신뢰도 90% 수준에서 구한 최적공정조건에서의 인장강도 추정범위는 279±38.57로 계산되었다.

Table 7은 직교배열조건에 따른 항복강도 결과를 각각 나타내었고 직교배열조건상의 인자수준에 대한 항복강도결과를 Fig. 7에 나타내었다. 실험결과를 보면 인장실험결과와 마찬가지로 가열압력인 인자 A, 업셋압력인 인자 B, 가열시간인 인자 C 및 업셋시간인 인자 D의 최대 항복강도 값을 지니는 조건은 각

**Table 4 Control factors and their level**

Factors	Symbol	First level	Second level	Third level
Heating pressure(MPa)	A	15	25	35
Upsetting pressure(MPa)	B	30	50	70
Heating time(sec)	C	0.5	1	1.5
Upsetting time(sec)	D	3	4	5

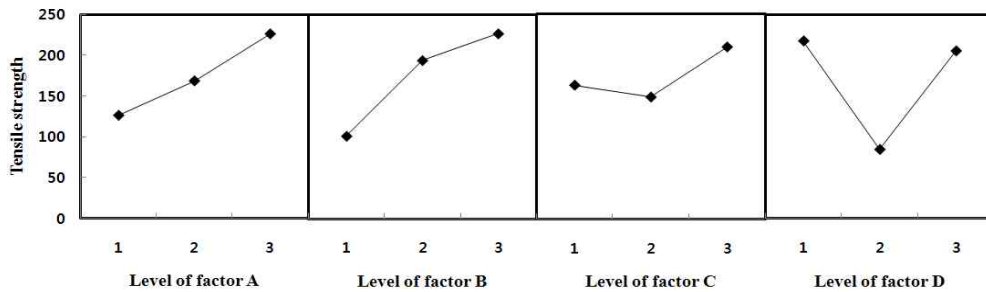
**Table 5 Experiment lay out and results of tensile strength**

Experimental No.	Factors				Measured tensile strength
	A	B	C	D	Y
1	15	30	0.5	3	49.26
2	15	50	1	4	109.22
3	15	70	1.5	5	220.14
4	25	30	1	5	75.48
5	25	50	1.5	3	231.42
6	25	70	0.5	4	198.97
7	35	30	1.5	4	177.55
8	35	50	0.5	5	240.54
9	35	70	1	3	260.59

각 수준 3, 수준 3, 수준 3 및 수준 1로 나타났다. (56.35%)이고 나머지 인자들은 가열압력(29.48%), 가열시간(12.98%) 순으로 나타났다. 신뢰도 90% 수준에서 구한 최적공정조건에서의 항복강도 추정범위는 238±31.73으로 계산되었다.

**Table 6 Results of the analysis of variance**

Symbol	Degree of freedom (DF)	Sum of squares (SS)	Mean of square (MS)	F <sub>0</sub> Characteristics	Contribution (%)
A	2	15120.793	7560.3963	24.0744	31.87
B	2	25546.925	12773.463	40.6742	53.84
C	2	6152.9541	3076.4771	9.7964	12.97
D(error)	2	628.0862	314.0431		
Total	8	47448.758			



**Fig. 6 Tensile strength vs. level of factors**

**Table 7 Experiment lay out and results of yield strength**

Experimental No.	Factors				Measured yield strength Y
	A	B	C	D	
1	15	30	0.5	3	35.82
2	15	50	1	4	99.94
3	15	70	1.5	5	190.46
4	25	30	1	5	69.20
5	25	50	1.5	3	206.46
6	25	70	0.5	4	172.01
7	35	30	1.5	4	149.54
8	35	50	0.5	5	203.99
9	35	70	1	3	224.39

**Table 8 Results of the analysis of variance**

Symbol	Degree of freedom (DF)	Sum of squares (SS)	Mean of square (MS)	F <sub>0</sub> Characteristics	Contribution (%)
A	2	10563.9758	5281.9879	24.8438	29.48
B	2	20191.3037	10095.6519	47.4848	56.35
C	2	4649.8141	2324.9070	10.9352	12.98
D(error)	2	425.2161	212.6081		
Total	8	35830.3097			

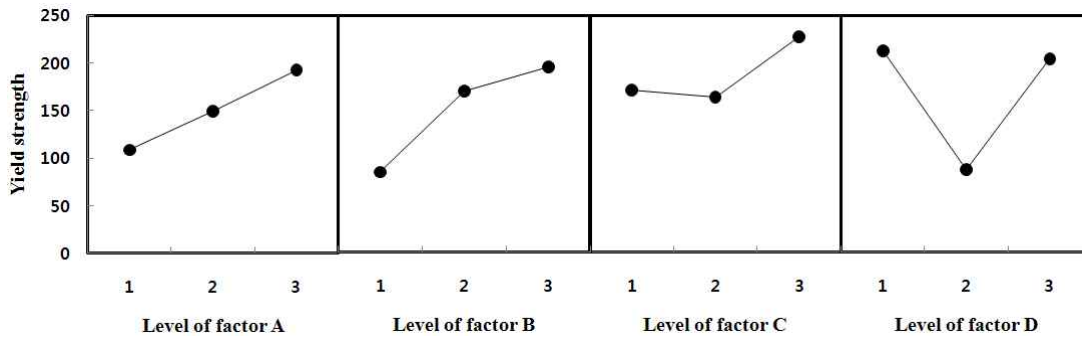


Fig. 7 Yield strength vs. level of factors

#### 4. 결론

이상과 같이 AZ31마그네슘합금의 마찰접합시 공정의 최적화를 위해 실험계획법이 이용되었다. 실험적 통계해석을 위해 스피들의 회전수를 일정하게 하고 가열압력, 가열시간, 엇셋압력 및 엇셋시간 등의 접합조건에 따른 인장실험 결과를 토대로 최적 마찰접합조건을 고찰하기 위해  $L_9(3^4)$ 의 직교배열법을 사용하였다. 그 결과 가열압력 35MPa, 엇셋압력 70MPa, 가열시간 1.5sec, 엇셋시간 3sec 조건이 최적공정조건으로 추측되고 신뢰도 90%수준에서 구한 최적공정 조건에서의 인장강도 및 항복강도의 추정범위는 각각  $279.10 \pm 38.57$ 과  $238.06 \pm 31.73$ 으로 계산되었다.

#### 후 기

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. S. W. Choi, "Automobile economic; The trend of automobile lightweight", 2008, pp. 37-47.
2. O. Khaselev, D. Weiss, J. Yahalom, J. Electrochem. Soc. 146, 1999, p. 1757.
3. O. Khaselev, D. Weiss, J. Yahalom, 2001,

Corrosion, Sic. 43, 2001, O. 1295.

4. AWS, Welding Handbook, 8th ed, Vol. 8, pp. 739-782.
5. P. Jennings, Some properties of dissimilar metal joints made by friction welding, Advances in welding processes, in; Proceedings of the Conference on Solid Phase Joining Processes, The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, 1971, pp. 147-152.
6. W. Lucas, Process parameters and friction welds, Met. Const. Brit., Weld. J. 1971, 293-297.
7. N. I. Fomichev, The friction welding of new high speed tool steels to structural steels, Weld. Prod, 1980, 35-38.
8. C. R. G. Ellis, Friction welding, some recent applications of friction welding, Weld. Met. Fab. 1977, 207-213.