

◎ 論 文

열간 금형펀치 제작을 위한 이종재 마찰용접과 고온크리프 실시간 예측 및 AE에 의한 품질평가(I) - 마찰용접과 AE⁺

박 일 동** · 오 세 규* · 김 지 수***
(99년 6월 17일 접수)

Friction Welding of Dissimilar Hot Die Punch Materials and Its Creep Prediction
and Quality Evaluation by AE(1) - FRW and AE⁺

Il-Dong Park** · Sae-Kyoo Oh* · Ji-Su Kim***

Key Words : Acoustic Emission(AE, 음향방출), Friction Welding(FRW, 마찰용접), Tensile Strength(인장강도), Welding Condition(용접조건), Heating Time(가열시간), Joint Efficiency(이음효율), Toughness(인성), Total Cumulative AE Counts(AE 총누적량), Base Metal(모재부)

Abstract

The complete joining method for dissimilar hot die punch materials and its real-time evaluation method are not available at present. Brazing method has been used for joining them, but it is known that the welded joint by the brazing has the lower bonding efficiency and reliability than the diffusion welding. The friction welding with a diffusion mechanism in bonding was applied in this study.

So, this work was carried out to determine the optimal friction welding conditions and to analyze mechanical properties of friction welded joints of hot die punch materials (STD61 for the blade part of hot die punch) to alloy steel (SCM440 for the shank part of hot die punch) such as plunger. In addition, acoustic emission test was carried out during friction welding to evaluate the weld quality.

⁺ 본 연구는 1998년도 부경대 대학원생 연구지원비에 의해 수행되었음

* 종신회원, 부경대학교 공과대학 기계공학부

** 정희원, 부산기능대학 금형학과

*** 정희원, 부경대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

종래의 일반 열간금형펀치 재료의 내구성 결여를 탈피하고, 내마모, 내충격재인 열간금형재료(STD61)의 일체형으로 사용함에 따른 고가 재료의 낭비를 줄이고 고정부 부분의 기계 가공 난점을 탈피하여 금형펀치 제작공정을 개량할 필요가 있다. 이를 해결하기 위하여 본 논문은 열간금형 펀치나 플런저 등의 날부 일부만 열간금형을 사용하고, 그 외 고정부나 자루(shank rod)부는 값싸고 절삭성이 있고 인성도 풍부한 재료를 사용하되, 이 두 이종 재료를 마찰용접에 의하여 금속학적 접합을 성공시키고자 한 것이다. 따라서 본 논문은 새로운 금형펀치 개발의 기초연구를 수행하므로써, 원가 절감과 내구성과 내충격성 향상 및 펀치 고정법 간이화 달성등 품질 향상과 원가 절감의 목적을 달성시키고자 한 것이다¹⁻³⁾.

본 연구에서는 이러한 두 이종 재료들 즉, 크롬몰리브덴강 SCM440과 열간금형재 STD61과의 마찰용접의 최적화 기술을 회전수, 마찰가열압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 결정에 의한 용접부 강도와 인성을 고려하여 연구하였다. 또한 이 마찰용접부의 품질(강도와 인성)을 용접 실시시간에 음향방출법(AE, acoustic emission)⁴⁻⁹⁾에 의하여 평가할 수 있는 기술을 연구하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 내열성과 내마모성 및 내부식성이 비교적 강한 SCM440 구조용합금강을, 그리고 고온 내마모성과 충격성이 강한 고온 금형재료로서는 우수한 성능을 가지고 있는 STD61을 사용하였다.

Table 1은 본 실험에 사용한 재료의 화학적 성분이고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt. %)

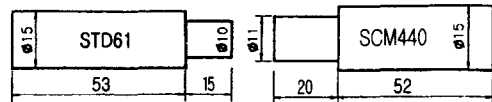
Materials	C	Si	Ni	Cr	Mn	P	S	Mo	W	V
STD61	0.37	1.00	-	5.00	0.50	0.02	0.02	1.25	-	1.00
SCM440	0.38	0.21	0.15	1.13	0.62	0.017	0.022	1.85	-	-

Table 2 Mechanical properties of base materials for dissimilar friction welding

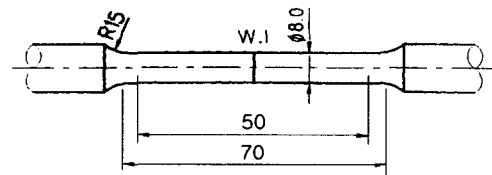
Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Hardness H_B
STD61	715	459	20.3	-
SCM440	1054	926	12.2	315

마찰용접을 하기 위한 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1 (a)와 같이 가공하여 실험을 수행하였고 동시에 AE실험을 수행하였다.

Fig. 1의 (b)는 용접시험편의 인장강도를 알기 위한 시험편으로 KS규격(B 0801 14A)에 따라 선삭과 연삭가공을 하였다.



(a) Friction welding and AE test workpiece



(b) Tension test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of specimens (unit : mm)

2.2 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE 시험에 사용된 시험기는 AE testing system (LOCAN 320, 16 channel)이며, 용접계면과 AE 센서와의 거리는 315mm, Gain 35dB, Threshold 40dB이며, Sensor는 R15를 사용하였다. 그리고, 이음부의 인장강도 시험에 사용된 만능시험기(UTM 25T)에서, 인장속도는 2mm/min으로, 모재와 용접재를 Fig. 1(b)와 같은 형상치수로 인장 시험편을 선반 가공한 후 연삭가공하여 인장시험을 수행하였다.

마찰용접의 최적화 실험을 위해서 우선 $\phi 10$ mm

와 $\phi 11\text{mm}$ 봉대봉(bar-to-bar)마찰용접 최적조건의 최적화를 시도하여야 한다. 즉, 문헌¹⁻³⁾을 조사하여 회전수(n)를 결정한후 가열압력(P_1), 가압압력(P_2)을 결정하고 여러번 실험을 반복 하여서 P_1 , P_2 를 선정한 후, 가압시간(t_1)을 선택하고 그 후 가열시간(t_2)을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도를 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1)을 결정 짓는다. 그리고, 용접시간 중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료까지 검출된 AE 누적총량과 용접강도와의 상관성을 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접변수와 용접품질간의 상관관계

본 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 마찰단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 마찰단조가압시간(t_2) 등이며, 여기서는 P_1 , P_2 를 결정한 후 마찰가열시간 $t_1(\text{sec})$ 을 여러 가지로 변화시켰다. Table 3 (Case 1)은 $\phi 10$ 과 $\phi 11$ 의 봉대봉 이종재 마찰용접의 조건을 나타낸 것이다.

Fig. 2는 최적 P_1 , P_2 의 범위를 인장시험을 통해 구한 것이며, P_1 , P_2 가 50, 100MPa에서 가장 높은 인장강도와 항복강도 값을 나타내는데, 이때 인장강도는 730MPa 이었다. 그리고, 파단위치는 용접계면에서 2.0~2.5mm 떨어진 열영향부로서 전형적인 컵·콘(cup & cone)형의 파단이었다.

Table 3 Welding conditions for dissimilar friction welding (FRW) of STD61 ($\phi 10$) to SCM440 ($\phi 11$)

Case	Rotation $n(\text{rpm})$	Heating pressure $P_1(\text{MPa})$	Forging pressure $P_2(\text{MPa})$	Heating time $t_1(\text{sec})$	Forging time $t_2(\text{sec})$	Total upset $U_i(\text{mm})$
1	2,000	30	60	4	4	5
		60	120	"	"	7.8
		80	160	"	"	11.4
		90	180	"	"	12.2
		100	200	"	"	15
2	2,000	50	100	0.5~8	4	2.8~12

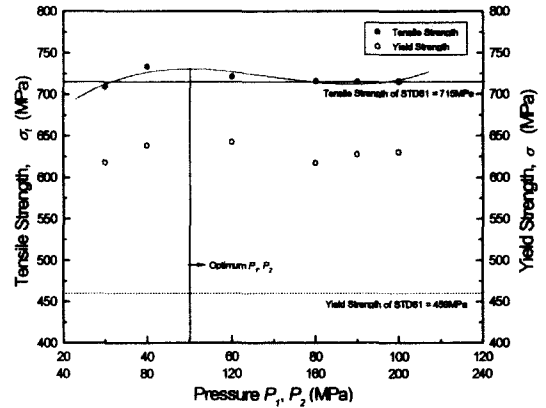


Fig. 2 σ_t vs P_1 , P_2 in dissimilar FRW of STD61 to SCM440 according to increasing heating and forging pressures
Welding condition : those of Table 3 (Case 1)

Fig. 3은 Table 3 (Case 2)과 같은 조건에서 시간 조정법으로 용접한 $\phi 10$ 과 $\phi 11$ 의 봉대봉 이종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t 와 가열시간 t_1 의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 $OptZ$ (optimum t_1 zone)는 $t_1=2\sim 3 \text{ sec}$ 이며 이때의 인장강도는 $\sigma_t=726 \text{ MPa}$ 을 나타내고 있다. 이것은 모재의 인장강도 715 MPa 보다 모두 상회하는 구간이다(이음효율 102%). 이때 σ_t 와 t_1 의 상관실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma_t = 0.492 t_1^3 - 7.39 t_1^2 + 28.32 t_1 + 693.6$$

$$(R^2 = 0.98)$$

(1)

이때 R^2 은 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 1(100%)에 가까우므로 실험식의 신뢰성이 매우 높다⁴⁻⁶⁾.

Fig. 4는 $\phi 10$ 과 $\phi 11\text{mm}$ 이종재 마찰용접에서 총업셋량 $U_i(\text{mm})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$ 간의 상관관계를 실험에 의해 구한 결과이다.

U_i 는 가열시간 $t_1(\text{sec})$ 에 따라서 2차함수적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이때 U_i-t_1 의 실험식은 다음과 같다.

$$U_t = -0.06 t_1^2 + 1.66 t_1 + 2.45 \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

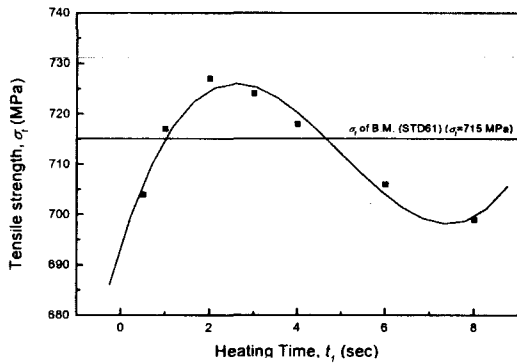


Fig. 3 σ_t vs t_1 of bar to bar($\phi 10$ to $\phi 11$) dissimilar FRW joints of STD61 to SCM440 Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

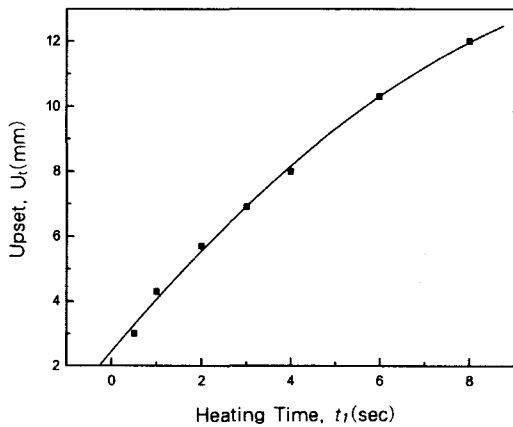


Fig. 4 U_t vs t_1 for $\phi 10$ to $\phi 11$ dissimilar FRW of STD61 to SCM440 Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

Fig. 4와 식(2)에 의하여 Fig. 3에서 구한 최적 $t_1=2\sim 3$ 초에 대한 U_t 를 구할 수 있으므로 최적 마찰용접을 시간조정법 대신 업셋조정법으로도 활용할 수 있음을 알 수 있다⁶⁾.

Fig. 5는 마찰용접부의 인성에 미치는 t_1 의 영향을 조사하기 위한 것으로서 마찰가열시간 t_1 의 영향을 조사하기 위한 것으로서 마찰가열시간 t_1 의 변화에 따른 연신율 ϵ (%)과 단면수축률 Ψ (%)의 상

관관계를 실험에 의해 구한 결과이다.

Fig. 5에서 파단부가 STD61 열영향부이므로 모재부의 단위면적당 연신율에는 약간 미치지 못하나, 마찰가열시간이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 3차함수적 변화 추세이다. 이는 가열시간에 따라 HAZ부의 증가에 따라 나타나는 현상이라 생각된다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.122 t_1^3 - 1.378 t_1^2 + 21.16 \quad (3)$$

$$\Psi = 0.226 t_1^3 - 2.632 t_1^2 + 7.227 t_1 + 68.78 \quad (4)$$

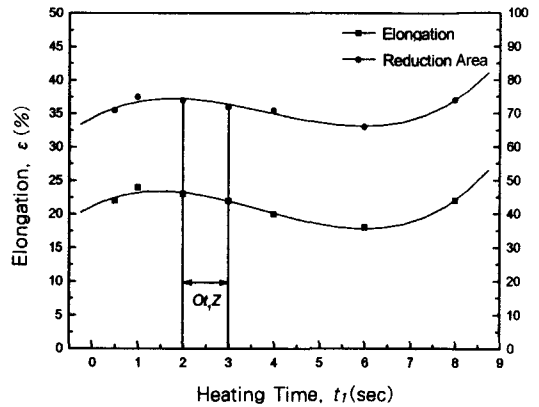


Fig. 5 Ψ vs t_1 , ϵ vs. t_1 of FRW joints of STD61($\phi 10$) and SCM440($\phi 11$) Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

Fig. 3에서 구한 $O_tZ(2\sim 3$ sec)에서의 ϵ 과 Ψ 는 매우 높은 범위에 속하므로 인성면에서 최적 가열시간을 $O_tZ = 2\sim 3$ sec에서 정함이 안전하다고 확인되었다.

3.2 용접변수와 AE총량 및 용접품질과의 상관관계

Fig. 6은 Table 3(Case 2)와 같은 용접조건하에서 STD61과 SCM440 시험편으로 마찰용접과 동시에 AE 시험을 수행한 결과를 나타내었다. $\phi 10$ mm과 $\phi 11$ mm 봉대봉의 용접에서 Fig. 3과 Fig. 5에서 구한 O_tZ 가 2~3sec일 때, AE 누적총량은 $ONZ = 35523\sim 44636$ counts이며, 또한 상관식을 최소자승법에 의해 다음과 같이 구하였다.

$$N = -1335.005 t_1^2 + 17856.84 t_1 + 2866 \quad (R^2 = 0.96) \quad (5)$$

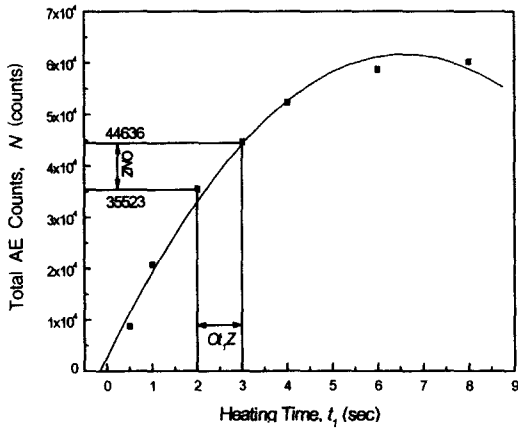


Fig. 6 N vs t_1 of bar to bar FRW of STD61(ϕ 10) to SCM440(ϕ 11)
Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

Fig. 7은 Table 3(Case 2)과 같은 용접조건하에서 이종재 STD61(ϕ 10)과 SCM440(ϕ 11)의 마찰용접시 AE 시험을 수행한 결과 AE 누적총량 N (counts)과 용접품질(인장강도) σ_t (MPa)와의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. 여기서 Fig. 6에서 구한 최적 AE 누적총량 ONZ가 35523~44636 counts이면 용접품질이 가장 우수하며 이음효율이 100% 이상이다. 이때 $\sigma_t - N$ 관계 실험식은 다음과 같이 전산화되었다.

$$\sigma_t = -3.304 \times 10^{-8} N^2 - 2.37 \times 10^{-3} N + 684.7 \quad (R^2 = 0.90) \quad (6)$$

따라서, 용접실시간에 발생한 AE총량 (N)을 측정하여, 이 AE총량이 최적범위 ONZ에 속하는지 여부를 확인하므로써 마찰용접 강도 (σ)면에서 이음효율이 100% 이상이 되고, 그 인성도 만족할 만한 것임을 평가할 수 있는, AE에 의한 마찰용접 품질의 실시간 평가 가능성이 본 연구의 열간 금형용의 이종재 마찰용접 최적화와 그 품질평가에서 입증되었고, 앞으로 이의 실용화 연구가 타연구의 결과⁸⁻¹⁵⁾와 마찬가지로 기대될 수 있다.

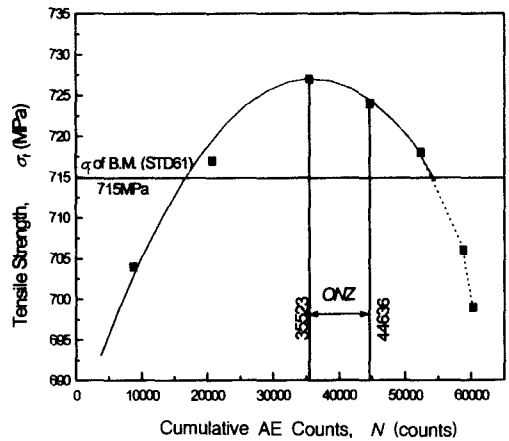


Fig. 7 σ_t vs. N in FRW of STD61(ϕ 10) to SCM440(ϕ 11)
Welding conditions : those of Table 3 (Case 2)

4. 결 론

열간 금형편치용 강재 STD61(ϕ 10)과 SCM440(ϕ 11)의 이종재 마찰용접기술과 AE 실시간 평가법의 개발을 위하여 이종재 마찰용접 최적화와 AE 평가에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) STD61과 SCM440 이종재 봉대봉의 압접을 위하여 마찰용접법 적용이 가능하였다.
- 2) 모든 시험편이 열영향부에서 인장파단 되었고, 최적용접조건에서의 용접부 이음효율이 100% 이상이 되었으며, 용접강도, 인성을 고려한 최적 용접조건은 다음과 같다.
 $n=2,000$ rpm, $P_1=50$ MPa, $P_2=100$ MPa, $t_2=4$ sec일 때, $t_1=2\sim 3$ sec
- 3) 봉대봉(ϕ 10과 ϕ 11)의 이종재 마찰용접 품질(인장강도, 인성)을 분석하였고 이에 따른 용접조건(가열시간 t_1 , sec)과 용접품질(인장강도, σ_t , MPa)과의 상관실험식을 다음과 같이 도출하였다. 즉,
 $\sigma_t = 0.492 t_1^3 - 7.39 t_1^2 + 28.32 t_1 + 693.6$ 이다.
- (4) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위 ONZ에서 마찰용접 이음효율이 100% 이상이 되는

용접품질(인장강도, 인성)을 얻을 수 있었고, 실제 마찰용접시 AE를 측정함으로써 실시간에 용접품질의 평가가 가능함을 알 수 있었다. 이때 AE총량(N , counts)과 용접부 인장강도(σ_t , MPa)와의 상관식은 다음과 같이 도출되었다.

$$\sigma_t = -3.304 \times 10^{-8} N^2 - 2.37 \times 10^{-3} N + 684.7 \text{ 이다.}$$

참고문헌

- 1) American Welding Society, "Welding Handbook", Vol. 2. p. 747, pp.672-763, 1991
- 2) 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, p. 46, pp.145-150, 184, 1976
- 3) 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", pp.1-106, 1984
- 4) Oh, S. K. and K. K. Wang, "Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp.22~33, 1983
- 5) Oh, S. K., K.K. Wang and G.R. Reif, "In-process Quality Detection of Friction Welds using Acoustic Emission Techniques", Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention on Kansas, USA, Tech. Sess. 5, Apr.; Welding Journal of American Welding Society, Welding Research Supplement, Vol. 61, No. 9, pp.312-316, 1982
- 6) Oh, S. K., "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques", Ph.D Thesis, Graduate School, Keio Univ, Japan, pp.1~314, 1982
- 7) Oh, S. K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 7. No. 2. pp.226~236, 1983
- 8) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한 기계학회지, 제 22권, 제 3호. pp.184~190, 202, 1982
- 9) Oh, S. K., "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 22, No. 3, pp.184~190, 1982
- 10) 오세규, 박종배, 공유식, "자동차 부품용강재(SM40C)의 마찰용접 최적화와 AE에 의한 실시간 품질평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 1, pp.88~93, 1999
- 11) 이상국, 오정환, 오세규, "엔진배기 밸브의 내열강 이중재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가", 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 1, pp.1~10, 1999
- 12) 양형태, 오세규, 김현경, "자동차 크랭크축용 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 피로강도특성 및 AE평가", 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 2, pp.74~82, 1999
- 13) 공유식, 오세규, 이배섭, "로켓모터용 노즐재의 관대관 마찰용접과 AE평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 2, pp.66~73, 1999
- 14) Oh, S. K., "Effects of Initial AE counts during Plastic Deformation in Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp.56~61, 1998
- 15) Oh, S. K., H.D. Park, B.S. Lee, "Friction Weld Quality Evaluation of Hydraulic Valve Spool Material by Acoustic Emission Technique", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 2, No. 1, pp.18~25, 1999