

회주철의 마찰용접 특성에 관한 연구 - 입열량 이론식을 중심으로 -

정 호 신^{*,†} · 방 국 수^{**}

^{*}부경대학교 공과대학 재료공학과

^{**}부경대학교 공과대학 신소재시스템공학과

Friction Weldability of Grey Cast Iron

- by the Concept of Friction Weld Heat Input Parameter -

Ho-Shin Jeong^{*,†} and Kook-Soo Bang^{**}

^{*}Dept. of Materials Science & Engineering, Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

^{**}Dept. of Materials System Engineering, Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

[†]Corresponding author : hsjeong@pknu.ac.kr

(Received March 13, 2014 ; Revised May 16, 2014 ; Accepted June 18, 2014)

Abstract

Joining of grey cast iron by fusion welding has much difficulties for its extremely low ductility and low toughness because of the flake form of the graphite. And the brittle microstructure, i.e. ledeburite may be formed during fusion welding by its rapid cooling rates. By these kinds of welding problem, preheat and post heat treatment temperature must be increased to avoid weld crack or welding problems.

In order to avoid these fusion welding problem, friction welding of cast iron was carried out for improving joint soundness, establishing friction welding variables.

There is no factor for evaluating friction weldability in continuous drive type friction welding.

In this point of view, this study proposed the parameters for calculating friction weld heat input.

The results obtained are as follows ;

1. There was a close relationship between tensile strength and flash appearance of friction welded joint.
2. Tensile strength was decreased and flash was severely oxidized as increasing frictional heating time.
3. As increased forging pressure P_2 , flash had a large crack and tensile strength was decreased.
4. As powdered graphite by rotational frictional force induced flat surface and hindered plastic flow of metal, tensile strength of welded joint was decreased.
5. Heat input for continuous drive type friction welding could be calculated by the factors of P_1 , P_2 and upset distance(δ).

Key Words : Grey cast iron, Friction welding, Friction pressure, Friction heating time, Upsetting time, Upsetting pressure, Calculated heat input for continuous drive type friction welding

1. 서 론

주철은 구조용 금속재료중에서 가장 생산량이 많고 종류도 다양하지만 그 중에서도 회주철의 사용량이 많은 비중을 차지하고 있다. 주철은 응고시에 흑연이 정출되며 이것이 팽창을 수반하는 주조재의 수축을 보완

하는 효과가 있을 뿐 아니라 흑연이 마찰에 의해 분체로 되어 윤활제의 역할을 하며 또 열전도성이 우수하기 때문에 마찰열의 발산에 효과적이다. 또 진동 감쇄능이 철강재료의 6-10 배 정도로 높기 때문에 각종 공작 기계, 내연기관이나 각종 자동차 부품을 비롯하여 많은 분야에 사용되고 있다¹⁾.

그러나 주철은 탄소 함유량이 높기 때문에 연성이 매

우 낮고 열충격에 약하므로 용융용접하기 매우 어려운 재료이다. 이 때문에 주철을 용융용접할 때에는 가능한 입열량을 줄여서 열충격을 완화하여야 하므로 종래에는 가스 용접이 많이 채용되어 왔다. 가스 용접할 경우에도 예열하여야 할 뿐 아니라 예열 이외에 용접 도중에 피닝을 시행하거나 Ni함유량이 높은 용접재료를 사용하여 용접하여야 하는 등 많은 어려움이 있다. 특히 용접시에는 주조의 경우보다 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 모재와 용접부가 백주철화되기 쉬워 취화될 뿐 아니라 일산화탄소가 다량으로 발생되기 쉽기 때문에 용접결함이 발생하거나 용접 자체가 곤란하게 된다²⁻⁵⁾.

따라서 주철을 용접할 경우에는 용접방법과 용접재료의 선정에 주의하여야 하며 상기한 바와 같은 방법에 의해 용접하더라도 기공이나 균열의 문제를 완전히 방지하기 어렵다.

이와 같은 주철의 용융용접시의 문제점을 피할 수 없는 것으로서 이 용접성의 개선을 위하여 마찰용접을 적용하면 가스의 발생이나 백주철화에 의한 각종 결함 생성을 방지할 수 있을 것이다.

마찰용접은 모재를 용융시키지 않는다는 점과 생산효율이 높고 자동화하기 쉬운 점 등 많은 장점이 있다⁶⁾. 종래에는 마찰용접이 환봉재의 경우에만 적용될 수 있다는 제약이 있었으나 최근에는 많은 발전을 이루어 위상제어방식을 도입하면 대상재의 형상에는 거의 제약이 따르지 않는다⁷⁾. 이러한 측면에서 마찰용접이 오버레이 용접의 분야에 적용되기에 이르렀다⁸⁾. 따라서 종래의 고전적인 기술로 치부되던 마찰용접이 새로운 관점에서 연구되고 있으며 앞으로 마찰용접의 적용 분야는 점점 더 확대될 것으로 기대된다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 주철 중에서 가장 용접하기 어려운 경우에 해당하는 회주철의 용접을 시도하였다. 회주철의 경우에는 용융용접에 대해서는 연구가 상당히 이루어져 왔으나 마찰용접에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

한편 시대적인 상황의 변화에 따라 실제로 현장에서 주철의 용접이 가능한 기능 인력의 확보도 매우 어려운 상황에 있다. 이와 같은 측면에서 주철의 용접성 향상을 위한 방편으로서 용융용접하지 않고 고상용접하므로써 주철 용접부의 건전성을 확보하고 용접성을 향상시키며 자동화하기 위한 방안으로서 마찰용접의 적용을 검토할 필요가 있다. 이러한 시대적인 상황 변화와 더불어 용접부의 특성 향상과 용접 조건을 확립할 필요가 있으나 체동식 마찰 용접의 경우에는 입열량에 관한 개념이 전혀 정립되어 있지 않다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 마찰용접시의 용접 입열량 선정을 위한 새로운 식의 정립과 이 식과 용접성과의 상관관계 확립 및

용접성의 평가를 위한 파라미터를 확립하고자 하였다.

특히 본 연구에서는 이러한 파라미터의 정립에 의하여 회주철의 용접성 향상과 회주철 결함부의 보수 측면에서 마찰 용접의 적용 가능성을 검토하여 현장 용접시의 적정한 용접조건과 용접성 및 용접부의 기계적 특성을 지배하는 인자를 규명하여 실제로 현장에서 적용할 수 있는 유효한 데이터를 제공할 수 있었다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

본 실험재료는 KS GC 250(JIS의 FC25)로서 그 화학조성을 Table 1에 나타낸다.

직경 30mm의 이 주조재를 선반가공하여 평행부의 직경을 18mm의 봉재로 하였고 선반 가공이 끝난 상태 그대로 마찰압접에 사용하였다.

2.2 입열량의 측정

마찰용접시의 입열량을 측정하기 위해 마찰용접시의 인자를 조절하고, 각 조건별로 열량을 측정하였다. 열량의 측정에는 Fig. 1와 같은 열량계를 만들어 측정하였다. 열량의 측정 시에는 마찰용접된 시험편을 마찰용접기에서 분리하여 즉시 두께 50마이크로미터의 순동 포일에 싸서 열량계에 투입하여 교반하고 온도의 변화를 측정하고 그로부터 열량을 계산하였다. 순동 포일로 시험편을 싸 이유의 시험편을 열량계에 투입할 때 물이

Table 1 Chemical composition of base metal

chemical composition, wt%				
C	Si	Mn	P	S
3.4	2.1	0.4	0.04	0.04

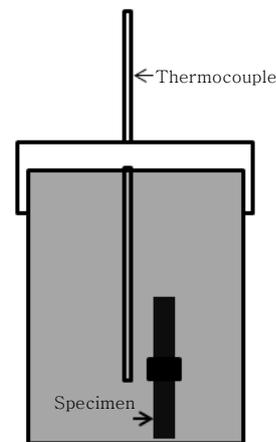


Fig. 1 Tool for measuring calorimetric heat input

비등하는 것을 막기 위함과 또한 열전도도가 빠르다는 이유 때문에 순동 포일을 사용하였다. 시험편은 마찰용접 종료 후 10초 이내에 열량계에 투입하였다. 열량계 내에 증류수와 증류수를 얼린 얼음을 넣어 0℃로 한 물 500g에 마찰용접이 끝난 샘플을 투입하였다.

2.3 마찰용접 조건

본 실험에서는 최대 추력 6톤의 제동식(continuous drive type) 마찰용접기(Nitto사)를 사용하였다.

마찰용접시의 인자로는 마찰압력(P_1), 마찰시간(t_1), 업셋 압력 (P_2), 업셋 시간 (t_2) 및 회전수가 있다. 본 실험에서는 회전수를 2360rpm으로 일정하게 하고 P_1, t_1, P_2, t_2 를 변화시켰다. 이들 인자 중에서 마찰시간 t_1 과 업셋 시간 t_2 는 예비실험에 의해 설정하였다.

마찰압접시에는 회주철을 예열하지 않고 마찰압력과 업셋 압력, 마찰시간, 업셋시간 및 업셋길이 등의 마찰 압접 인자를 조절하였다.

Table 2는 마찰용접 과정 중에 발생하는 열량을 측정하기 위한 마찰용접조건을 나타낸다. 이 경우의 마찰 용접조건은 P_1 과 P_2 를 각각 18.6kgf/cm^2 으로 하고 t_1, t_2 는 각각 20초로 하였다. 이 표 중의 E값은 후술하는 실험식에 의한 계산값이며, 이 계산값을 Joule로 환산한 값을 J, 열량계를 사용하여 실제로 열량을 측정된 값은 Q이다.

Table 3는 마찰용접부의 강도 특성을 조사하기 위하여 실시한 마찰용접조건을 나타낸 것이다.

마찰용접 시 P_1 은 각각 $12.4, 18.6$ 및 24.8kg/cm^2 으로, P_2 는 18.6 에서 37.2kg/cm^2 로 변화시켰고, 마찰시간 t_1 은 예비 실험에서 마찰시간 t_1 이 짧을 경우, 발열이 불충분하여 마찰압접이 불가능하였기 때문에 예비 실험 결과를 기초로 40-240초로 하였다. 또한 업셋 시간 t_2 는 10-15초로 변화시켰다.

실험 중 마찰압접 인자를 기록하기 위하여 레이저 변위계, 주축의 회전계 및 유압계를 이용하여 이들 인자의 시간적인 변화를 기록하였다.

마찰용접부는 인장시험, 마크로 단면 검사, 현미경 검

사 및 파면 관찰 등에 의해 평가하였다.

2.4 마찰용접 과정의 관찰

회주철의 마찰용접중의 상황을 비디오로 촬영하여 마찰용접중의 마찰 발열과정 및 압접과정에 따른 플래쉬 형성등 마찰용접중의 상황의 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 또한 비디오 촬영한 영상을 칼러 비디오 프린터로 출력하여 용접 상황을 관찰하였다.

2.5 인장시험

회주철은 본질적으로 인성과 연성이 매우 낮기 때문에 각국의 규격에는 인장강도에 대해서 규정되어 있고 굽힘시의 굽힘각도나 충격 흡수 에너지에 대해서는 규정하고 있지 않다. 이것은 회주철의 연신율과 인성은 거의 영에 가깝기 때문에 굽힘시험과 충격시험에 의한 물성의 평가가 무의미하므로 주로 인장시험에 의한 평가가 이루어지고 있다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 마찰용접부의 기계적 특성을 인장시험에 의해 평가하였다. 인장시험편은 JIS Z 2201의 금속재료 인장시험편 4호 시험편으로 가공하여 인장시험에 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

재료의 마찰용접성의 평가는 재료에 부여된 열량이 중요한 영향을 미치지만 현재까지 플라이휠 방식의 마찰용접의 경우에는 입열량 계산식이 존재하지만 제동식 마찰용접의 경우에는 마찰용접 입열량에 관한 개념이 정립되어 있지 않다. 이것은 제동식 마찰용접시의 인자 인 P_1, P_2, t_1, t_2 등이 상호 복합적으로 관계되기 때문에 수식화하기 어려웠기 때문이다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 입열량을 간편하게 계산할 수 있는 식을 도입하여 입열량과 마찰용접성과의 상관관계를 고찰해보기로 한다.

Fig. 2에 제동식 마찰용접시의 용접시간에 따른 압력의 거동을 모식적으로 나타낸다. 용접 개시로부터 P_1 의 압력에 도달하는 시간과, P_1 에서 P_2 에 도달하기까지의

Table 2 Friction welding condition for measuring heat input

specimen No.	Area, cm ²	δ, cm	P_1	P_2	$P_1 P_2 / P$	E(kgf·cm)	J	Q
1	2.543	0.2	18.6	18.6	18.6	9.46	9.271	2.13
2	2.543	0.4	18.6	18.6	18.6	18.92	18.542	4.62
3	2.543	0.6	18.6	18.6	18.6	28.37	27.80	6.45
4	2.543	0.8	18.6	18.6	18.6	37.84	37.08	9.67
5	2.543	1.0	18.6	18.6	18.6	47.3	46.35	11.88

Table 3 Friction welding condition of grey cast iron

No. of Specimen	P ₁ (kgf/cm ²)	t ₁ (sec.)	P ₂ (kgf/cm ²)	t ₂ (sec.)	rpm	δ	σ _u (kgf/mm ²)
1	12.4	120	24.8	10	2360	1.18	11.97
2	18.6	120	31.0	10	2360	4.23	19.83
3	18.6	240	31.0	10	2360	27.14	8.20
4	24.8	120	37.2	10	2360	5.48	11.26
5	24.8	40	37.2	10	2360	5.05	13.91
6	18.6	120	24.8	10	2360	1.67	17.78
7	18.6	120	18.6	10	2360	2.80	14.11
8	18.6	120	18.6	10	2360	2.82	14.32

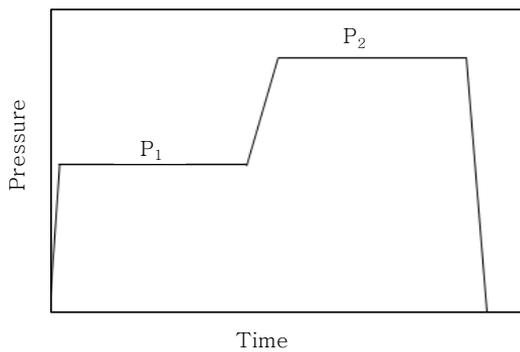


Fig. 2 Schematic diagram for continuous drive type friction welding

시간은 극히 짧기 때문에 이를 무시하고, 연속구동 방식인 경우의 용접전후의 길이 변화량과 압력의 곱에 의해 주어지는 일의 양은 에너지보존법칙 즉 용접 입열을 J , 용접 대상재의 단면적을 A , 용접후의 시험재의 길이 변화량을 δ , 발열 단계에서의 길이 변화량을 δ_1 , 업셋 단계에서의 길이 변화량을 δ_2 라고 하면

$$J = P_1 A \delta_1 + P_2 A \delta_2$$

$$= A(P_1 \delta_1 + P_2 \delta_2) \text{로 둘 수 있다.}$$

여기서 P_1, P_2 는 각각 마찰압력과 업셋 압력이다.
또 $P = P_1 + P_2$ 라 두고 마찰 발열 단계와 업셋 단계에서의 길이 변화량은 각각 압력 분률에 비례한다고 가정하면

$$\delta_1 = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \delta, \quad \delta_2 = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \delta \text{ 이고 이 식을 위}$$

식에 대입하면

$$J = A\delta \left(P_1 \frac{P_1}{P_1 + P_2} + P_2 \frac{P_2}{P_1 + P_2} \right)$$

$$= A\delta \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_1 + P_2}$$

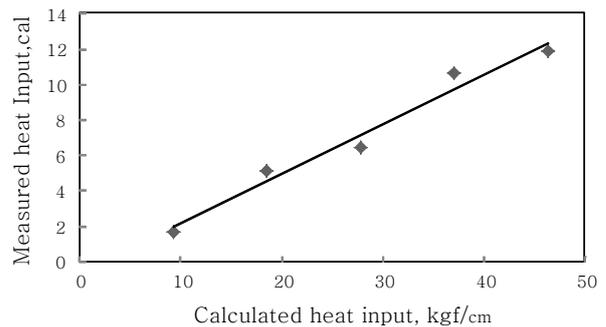


Fig. 3 The relation between calculated heat input and measured heat input.

$= A\delta \left(P - 2 \frac{P_1 + P_2}{P} \right)$ 로 되어 마찰용접시의 압접 조건 P_1, P_2 및 길이 변화량 만으로 입열량을 계산할 수 있다.

다소의 오차는 존재할 수 있지만 이 식의 유용성을 검증하기 위하여 이러한 과정을 거쳐 발열량 계산값 J 와 측정값 Q 와의 관계를 Fig. 3에 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 값 사이에는 상당히 양호한 상관관계가 존재함을 알 수 있고, 이에 따라 계산식을 입열량 계산식으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4에 마찰압접부의 인장시험 결과를 나타낸다. 마찰압접부의 인장강도는 마찰압접 조건에 따라 매우 편차가 크을 알 수 있다. 인장강도는 마찰압접 조건에 따라 강도가 폭 넓게 변화되므로 회주철 마찰압접시의 마찰압접조건 선정이 매우 중요한 인자가 됨을 알 수 있다.

이러한 원인은 후술하는 파면 관찰 결과에서 설명하지만 마찰압접 조건의 적절한 선정에 의해 더욱 더 이 음 효율을 높일 수 있는 연구가 기대된다.

Fig. 4는 입열량 계산값과 마찰용접부의 인장강도와의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입열량이 증가할수록 인장강도는 거의 직선적으로 증가하지만 그 후 입열량이 더 커지면 입열량의

Table 4 The relation between heat input and tensile strength

Specimen No.	Area, cm ²	δ, mm	$P-2 \frac{P_1 P_2}{P}$	J(kg·cm)	σ_u , (kgf/mm ²)	elongation(%)
1	2.543	1.18	20.67	6.20	11.97	0
2	2.543	4.23	26.35	28.34	19.83	0
3	2.543	27.14	32.24	222.51	8.20	0
4	2.543	5.48	32.24	44.93	11.26	0
5	2.543	7.36	22.14	41.44	13.91	0
6	2.543	4.80	18.60	22.70	17.78	0
7	2.543	2.80	18.60	13.24	4.11	0
8	2.543	2.82	22.14	15.88	14.32	0
base metal					21.2	0

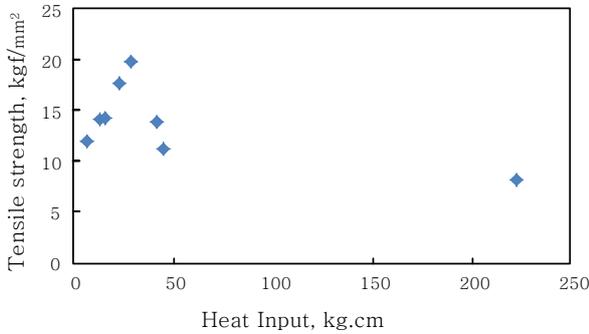


Fig. 4 Effect of heat input for tensile strength for friction welded joint

증가에 따라 인장강도가 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 인장강도의 극대값을 나타내는 값이 최적의 마찰용접조건임을 알 수 있다. 또 극단적으로 입열량이 커지면 접합부의 인장강도는 매우 낮아짐을 확인할 수 있었다.

또 극단적으로 입열량이 커지면 접합부의 인장강도는 매우 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 마찰용접부의 외관과 강도 사이에는 상관관계가 존재하며 마찰시간 t_1 이 짧을 경우에는 발열이 불충분하여 플래쉬가 거의 형성되지 않았으며 이러한 경우에는 발열 불충분에 기인하여 충분한 강도가 얻어지지 않았다.

한편 엽셋 압력이 가장 높은 경우에는 발열에 의해 연화된 플래쉬 부분이 재료에서 박리되고 플래쉬 부분이 심하게 산화되는 문제도 존재하고 인장강도도 낮았다. 또 플래쉬나 그 인접부가 산화될 경우에는 예외없이 인장강도 낮았다.

이상에서 설명한 바와 같이 회주철 마찰용접부의 인장강도는 압접부의 외관과 깊은 관련을 가짐을 알 수 있었다. 즉 플래쉬 부분이나 그 인접부가 산화되면 인

장강도가 낮아진다는 것과 플래쉬에 큰 균열이 존재할 경우에도 인장강도가 낮았다.

이러한 측면에서 회주철 마찰용접부의 강도를 향상하기 위해서는 마찰용접조건이 매우 중요함을 알 수 있었다.

회주철 마찰용접시 플래쉬나 그 인접부가 심하게 산화되거나 균열이 발생하는 이유는 회주철의 연성이 근본적으로 낮기 때문에 외관이 양호한 플래쉬가 형성되지 않고 박리되기 때문이다.

이러한 상황을 Fig. 5에 나타내며 이 경우에는 인장강도가 19.83kgf/mm²으로 강도값이 가장 높았던 시험편 번호 2에 대한 것으로 용접과정중의 상황을 순차적으로 제1열에서부터 좌에서 우방향으로 각각 용접 개시후 18초, 28초, 36초, 45초, 54초, 62초, 65초, 70초, 80초 경과 시의 발열 상황을 나타낸 것이다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 마찰시간이 경과할수록 점점 가열폭이 커지고 플래쉬가 형성됨을 알 수 있으나 용접의 진행에 따라 플래쉬가 형성되고 마찰용접 최종 단계에 이르면 플래쉬 표면에 균열이 발생됨을 알 수 있다.

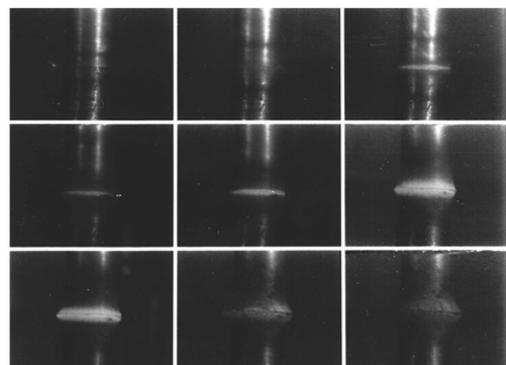


Fig. 5 Flash appearance during friction welding for specimen No.2

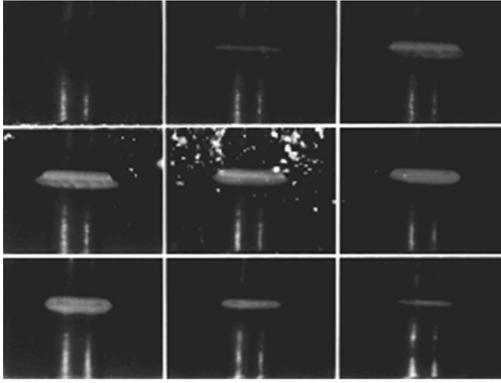


Fig. 6 Flash appearance during friction welding for specimen No.3

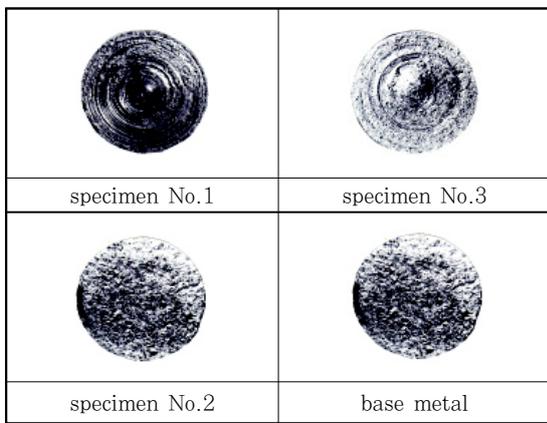


Fig. 7 Appearance of fractured surface for tensile test specimen

Fig. 6은 입열량이 가장 큰 시험편 3의 마찰용접 과정중의 상황을 나타낸 것으로 마찰용접 시간이 경과할 수록 흑연이 산화되어 비산되기 시작하여 어느 시간에 이르면 급격하게 비산되는 흑연의 양이 많아진다. 이것은 회주철 중에 존재하는 탄소 함유량의 저하와 직결되고 이에 따라 강도가 낮아지는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 마찰용접재 및 모재의 인장시험후의 파단면을 나타낸 것이다. 시험편 번호 1의 입열량이 상대적으로 적은 시험편이나 상대적으로 입열량이 가장 많은 경우인 시험편 번호 3의 경우에는 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 마찰압접 과정 중에 동심원상으로 소성변형된 흔적을 알 수 있다. 즉 마찰압접 중에 흑연이 분쇄되어 계면 곳곳에 띠를 이루고 있고, 평탄부 사이에 금속이 공급되지 않은 흔적을 확인할 수 있다. 즉 마찰용접 중에 흑연이 분쇄되어 계면 곳곳에 띠를 이루고 있고 평탄부 사이에 금속이 공급되지 않은 흔적을 확인할 수 있다. 이러한 띠 부분은 거의 소성변형되지 않아 평탄함으로 이 부분이 인장력의 작용으로 쉽게 파괴될 것으로 생각된다. 입열량이 적은 경우에는 상대적으로

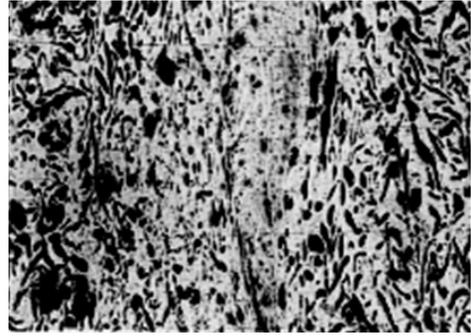


Fig. 8 Microstructure of friction welded joint

발열량이 부족하기 때문에 이와 같은 미접합부가 존재하는 것이고, 또 입열량이 지나치게 많은 경우에는 용접과정중에 비산되어 소모되는 금속의 양이 많기 때문에 생기는 현상으로 사료된다. 따라서 회주철의 마찰용접시의 강도를 향상시키기 위해서는 마찰용접 인자의 선정이 매우 중요함을 알 수 있다. 이에 비해 상대적으로 적절한 입열조건이라고 생각되는 시험편 번호 2의 경우에는 모재의 파면과 외관상의 차이는 없고 미접합부로 생각되는 부분도 없었다. 이에 따라 적정 용접조건인 경우에는 강도가 상대적으로 높은 것으로 사료된다.

Fig. 8에는 마찰용접부의 현미경조직을 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 그림 중앙부의 용접 계면에는 상대적으로 flake 모양의 흑연이 모재부에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있고, 또 업셋팅시에 흑연이 축 방향으로 밀려나 축력의 작용 방향에 거의 직각으로 배열되어 있음을 알 수 있다. 이에 따라 모재에 비해 강도가 낮아지는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 6에서 이미 설명한 바와 같이 마찰용접 과정중에 흑연이 비산한다는 결과를 뒷받침하는 것으로 사료된다. 회주철의 인장강도는 잘 알려져 있는 바와 같이 탄소 당량식에 비례하기 때문에 흑연이 비산되어 접합부에 탄소함유량이 저하하게 되면 인장강도가 낮아지기 때문에 마찰용접중에 여하히 흑연의 비산을 막을 것인가가 중요할 것으로 사료된다.

흑연은 잘 알려진 바와 같이 윤활 작용을 하기 때문에 금속과 금속 사이의 소성 흐름을 방해하여 마찰용접 후에 미접합부를 생성하는 원인으로 작용할 뿐만 아니라 용접부의 강도에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 여하히 이러한 분쇄된 흑연의 양을 적게 할 것인가가 회주철의 마찰용접과 관련하여 중요한 인자 중의 하나인 것을 확인할 수 있다.

결 론

회주철의 용접성 향상을 위하여 마찰용접조건 선정

과 압접부의 기계적 특성에 미치는 인자를 조사, 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회주철 마찰 압접부의 인장시험편의 파단면 외관과 기계적 특성 사이에는 깊은 상관관계가 존재하였다.
- 2) 이론적으로 계산한 입열량이 증가함에 따라 인장강도는 거의 직선적으로 증가하며, 극대값에 도달한 후에는 입열량이 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하는 경향이였다.
- 3) 제동식 마찰용접시의 입열량은 마찰압력(P_1), 엽셋 압력(P_2) 및 길이 변화량 (δ)에 의해 계산할 수 있었다.
- 4) 흑연이 분쇄된 부분은 인장파면의 평탄화와 금속 소성 유동능의 저하 때문에 공동이 많이 존재하므로 인장강도가 낮아진다.
- 5) 마찰용접 과정 중에 발생하는 흑연의 소실을 막는 것이 회주철 마찰용접부의 강도 측면에서 유리하다.

후 기

‘이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013)에 의하여 연구되었음’

Reference

1. 日本金屬學會, 鐵鋼材料便覽, 1981, 837~846 (in Japanese)
2. AWS, Welding Handbook, vol.4, 7th ed., 217-225
3. 鈴木春義, 最新溶接ハンドブック, 1978, 473-480 (in Japanese)
4. ASM, Metals Handbook, 9th ed., vol.6, Welding, Brazing, and Soldering, 1985, 307-319
5. 日本溶接學會, 溶接接合便覽, 丸善, 860-864 (in Japanese)
6. 摩擦壓接協會, 摩擦壓接, コロナ, 1979, 6-8 (in Japanese)
7. D.E. Spindler, What industry needs to know about friction welding, Welding Journal, **73-3** (1994), 37-42
8. E.D.Nicholas, Linear friction welding, Lectures on the 3rd International DVS conference, Flash butt and friction welding with allied processes, 1991.12, 18-24
9. PSSC, PSSC Physics, Tamgudang, 485-487 (in Korean)