

이종마찰압접재의 압접조건에 따른 기계적 성질의 거동 — STS304와 SM15C 재를 중심으로 —

오 환 섭*, 오 정 국**, 박 준 건***, 허 민 구***

Behavior of Mecnanical Properties of Friction Welded Materials for Various Friction Welding Conditions — For STS304 and SM15C —

Hwan-Sup Oh*, Jung-Guk Oh**, Joon-Gun Park***, Min-Goo Hur***

Abstract

In this study, behavior of deformation and mechanical properties under static tensile load in friction welded dissimilar materials, and necking phenomenon occuring at yeilding point are shown. Behavior of Hv(Micro Vickers Hardness) is observed that the maximum value is occured near by the interface, and the minimum value is arised at the heat affected zone. Fracture occured at the minimum value of Hv of the heat affected zone is observed. The position of fracture surface is subjected to behavior of Hv. Yielding strength subjected to friction welding conditions, specially to upset pressure is shown.

Keyword : 마찰압접(Friction welding), 이종재료(Dissimillar material), 열영향부(Heat affected zone), 항복점에서의 네킹(Necking on yeild point)

1. 서 론

마찰압접은 피접합물의 회전 마찰운동에 의하여 발생하는 마찰열을 이용하여 접합면을 급속히 가열하고 동시에 가압하여 접합면에 소성 변형을 일으키며 접합하는 방법이다. 이 방법은 높은 에너지 효율, 공정의 간편성, 자동화의 용이성, 낮은 비용 등의 면에서 우수한 특징을 가지고

있다. 그러나 현재 자동차 부품 등 각종 분야의 실용부품으로 응용되고는 있으나 일반화 되지 못하고 있는 실정이다. 그 이유로서 아직 데이터가 적은 경우도 있으나, 이런 문제를 포함해서 압접재의 기계적 성질⁽¹⁾, 피로강도⁽²⁾ 및 균열 진전거동⁽³⁾ 등에 대한 연구가 있으나 아직 체계적으로 충분한 해명이 되어있지 않다.

특히 이종마찰압접의 경우 여러 가지 압접조건에 의한

* 경희대학교 기계공학과

** 조선대학교 기계공학과

*** 경희대학교 대학원

영향을 많이 받게되며, Hazlett^{(5), (6)}은 SAE1020과 AISI4130을 가열압력, 업셋(Upset) 압력, 업셋량을 변화시켜 인장강도 및 압접부의 조직을 검사한 결과 압접강도는 업셋압력에 따라 다르고 최적조건을 초과하면 오히려 강도가 떨어진다고 하였다. Hasui⁽⁸⁾는 SM45C 조질 강봉과 SM25C 압연봉을 압접한 결과 업셋(Upset)되기 시작하는 직후에 회전을 정지하도록 조정하는 것이 좋으며 업셋지연시간을 약 1초로 하였을 때 적은 업셋량으로도 충분한 이음강도를 얻을 수 있다고 하였다.

현재 이종마찰압접재의 경우 몇몇 실용부품에 응용될 뿐 가혹한 조건이나 신뢰성이 요구되는 분야 등에는 아직 적용이 지연되고 있는 실정이다.

따라서 마찰압접의 특성을 유용하게 활용하기 위해서는 마찰압접재의 기계적 성질에 대한 검토와 파괴역학적 관점에서 적극적인 평가방법이 확립되어야 하고, 이것에 의한 접합 이음의 강도평가와 데이터의 축적이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이상의 관점에서 마찰압접재의 기계적 성질을 규명하기 위한 기초연구로서 냉간압연한 STS304와 SM15C를 업셋압력과 업셋시간을 중심으로 마찰압접하고 정적 인장하중 하에서 이종마찰압접재의 변형거동과 기계적 성질의 거동을 검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1. 실험재료 및 시험편

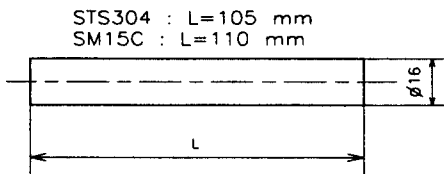


Fig. 1 Specimen for friction welding

본 실험에 사용한 실험재료는 일반적으로 내열재료로서 많이 사용되는 냉간압연한 STS304와 SM15C재를 선정하였고, 화학성분 및 모재의 기계적 성질을 각각 Table 1, Table 2에 표시하였다.

마찰압접을 위한 시료의 치수는 Fig. 1과 같이 지름은 16mm의 것을 사용하고, 압접시 소성유동으로 감소되는 길이의 변화를 고려하여 각각 STS304의 경우 105mm, SM15C의 경우 110mm로 하였으며 마찰압접 후의 길이는 약 200mm가 되도록 하였다.

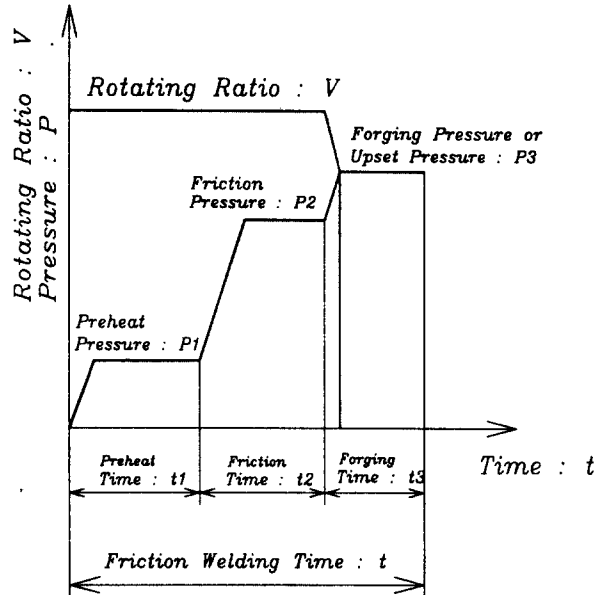


Fig. 2 Schematic illustration of friction welding process

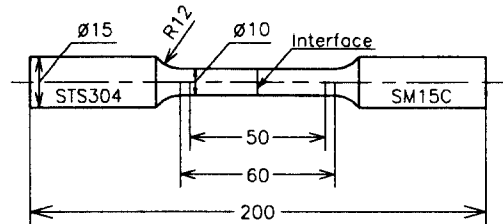


Fig. 3 Shape and dimensions of specimen

Table 1. Chemical composition of material(wt%)

Component \ Material	STS304	SM15C
C	0.08	0.16
Si	1.17	0.21
Mn	2.28	0.52
P	0.045	0.02
S	0.30	0.35
Ni	8.91	0.18
Cr	24.39	0.16

Table 2. Mechanical properties of base metal

Mech. Properties	Material	
	STS304	SM15C
Yield Strength σ_Y (MPa)	604.00	680.62
Tensile Strength σ_B (MPa)	731.63	701.81
Elongation (%)	29.09	7.03
Reduction (%)	77.20	47.44
Vickers Hardness (200gr)	257	224

Table 3. Conditions of friction welding

Specimen Series Welding Condition	FW1	FW2	FW3	FW4	FW5	FW6	FW7
	Preheating Pressure P_1 (MPa)	45	45	45	45	45	45
Preheating Time t_1 (sec)	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5
Friction Pressure P_2 (MPa)	100	100	100	125	125	125	125
Friction Time t_2 (sec)	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5
Upset Pressure P_3 (MPa)	125	125	125	162.5	162.5	162.5	162.5
Upset Time t_3 (sec)	0.5	0.8	1.2	0.5	0.8	2	3

마찰압접은 습식브레이크식 마찰압접기를 사용하였고, 마찰압접공정은 Fig.2와 같다.

본 연구에서는 이종마찰압접재의 기계적 성질에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 생각되는 업셋압력과 업셋시간을 달리하여 Table 3과 같은 압접조건하에서 7종류의 시료를 제작하여 사용하였고, 시험편의 형상 및 치수는 KS B14호 규격에 따랐고 Fig. 3과 같다.

2-2. 실험방법

인장시험을 행하기에 앞서 가공한 시험편의 표면은 #300~2400 사포를 사용하여 연마한 후 0.01 μ m의 산화알루미나 파우더를 사용하여 미세연마하여 시험편 표면에 발생할 수 있는 노치(Notch)와 가공경화에 의한 표층부와 내부의 기계적 성질의 변화를 최소화 하였다.

본 실험에서 사용한 시험기는 ZWICK 25ton 인장시험기를 사용하였고 시험속도는 1mm/min 으로 일정하게 하였다. 경도시험은 Micro-Vickers 경도계를 사용하였고 시험시 하중은 200gr, 하중 유지시간은 15초로 하였다. 금속조직 관찰은 Nital 3%의 부식액을 사용하였고 광학현미경을 사용하여 관찰하였다.

또 네킹현상의 관찰은 인장시험기에 카메라를 부착하고, P- δ 선도를 기준으로 관측하였다.

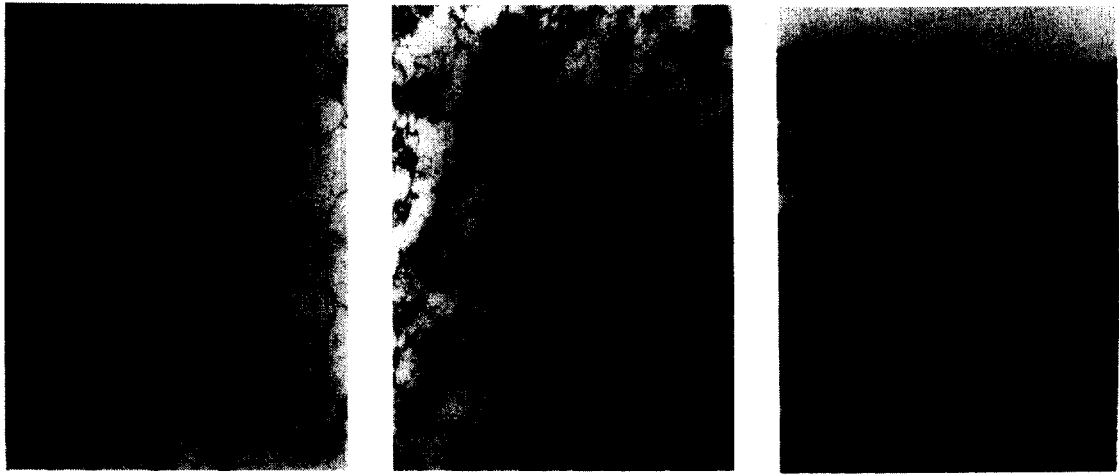
3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 접합계면주위의 금속조직

Fig. 4는 마찰압접재의 대표적인 금속조직을 표시한 것으로서 냉간압연한 SM15C와 STS304를 열처리과정 없이 마찰압접한 후 접합계면을 중심으로 관찰한 SM15C의 금속조직을 표시한 것이다. (a)는 냉간압연한 모재 조직의 형상 및 방향을 볼 수 있으며 검게 표시되는 펄라이트(Pearlite)와 밝게 표시되는 페라이트(Ferrite)의 분포도를 볼 수 있다. (b)는 접합계면으로부터 약 1mm 정도에서 관찰한 것이다. 이는 열영향부에서의 조직을 관찰한 것으로 고온의 마찰열에 의하여 펄라이트 조직이 미세화되어 있음을 알 수 있다. (c)는 접합계면을 중심으로 아래쪽이 SM15C재이고, 위쪽이 STS304재이며 SM15C쪽의 경우 탄화물을 포함하는 페라이트 조직이 미세화된 것을 알 수 있고, STS304재와 SM15C재의 금속학적 성질의 다름에도 불구하고 중심부분은 직선형상으로 접합되어 있음을 알 수 있다.

3-2. 접합계면주위의 경도값의 변화거동

Fig. 5는 접합계면을 중심으로 경도값의 변화거동을 조사한 것의 대표적인 예로서 FW7재의 경우를 표시하였다. 경도값은 모든 시험편 종류에 대하여 같은 경향을 보이고 있으며, 전반적으로 모재(SM15C와 STS304)에 비하여 접합부(접합계면을 포함하는 영역)가 낮으며 또, 접합부에서는 접합계면에서의 경도값이 가장 높고 접합계면



(a) Base material (b) Heat affected zone (c) Interface zone

Fig. 4 Microstructure of specimen($\times 400$)

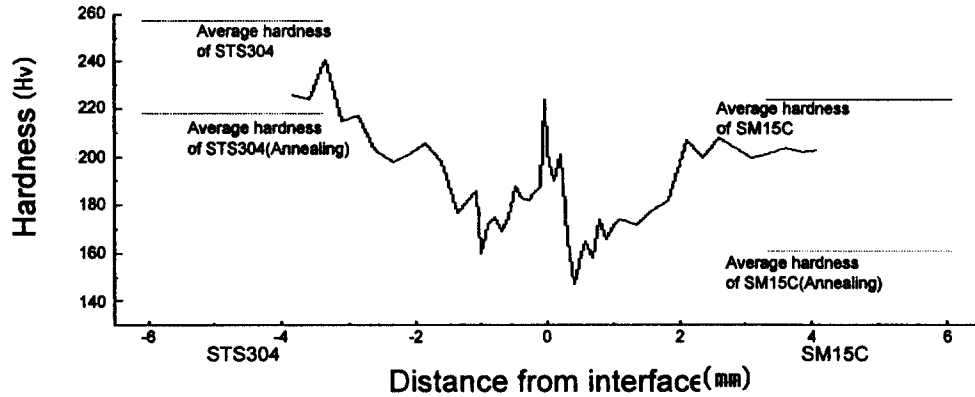


Fig. 5 Behavior of hardness of friction welded specimen by Micro Vickers hardness for 200gr.

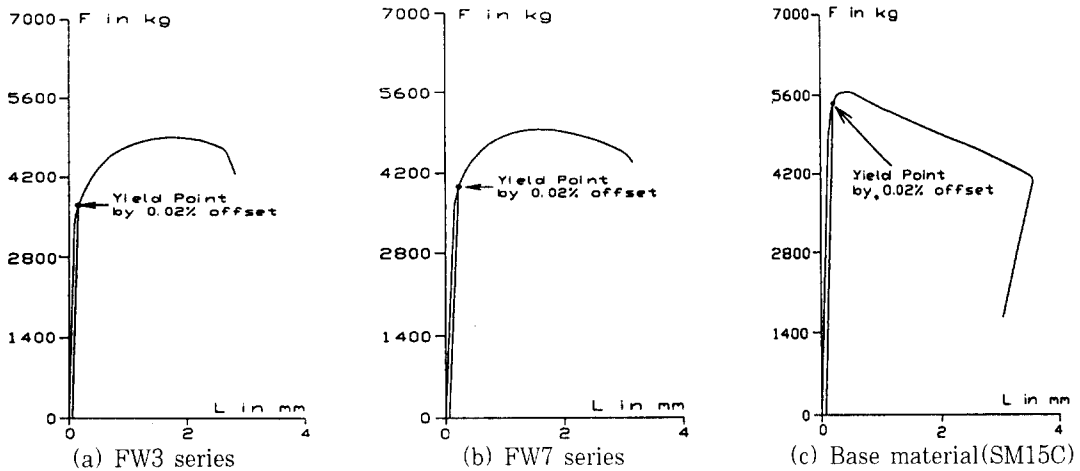


Fig. 6 Typical illustration of load-deflection curve

주위(열영향부)에서 최소 경도값을 보이고 있다.

모재부의 경도값의 변화거동은 냉간압연시 발생하는 모재의 가공경화에 의해 접합계면에 비하여 높게 나타나게 되고, 접합계면 주위영역의 경우는 마찰압접시 순간적인 고온에 의해 발생하는 국부적인 열처리 효과에 의해 모재부에 비해 낮게 나타난다고 생각된다.

3-3. 정적 인장하중하에서의 변형거동

3-3-1 P-δ 선도의 특성

Fig. 6의 (a), (b)는 마찰압접에서 가장 중요한 인자인 압접압력과 압접시간을 각각 변화하였을때의 예를 표시한 것이다.

어느 경우나 P-δ 선도의 모양의 유사하고 상·하항복점이 분명히 나타나지는 않으며 탄성영역과 소성영역은 변곡점을 기준으로 구분할 수 있는 정도이다. 그러나 Fig. 6의 (a), (b)와 (c)의 소성영역(항복하중에서 최대하중 사이의 영역)을 비교하면 크게 다르다. 즉, 마찰압접재의 소성영역은 모재의 경우 소성영역이 작는데 비하여 크고, 소성불안전영역은 모재의 경우 큰데 비하여 짧게 나타나고 있다. 항복점이란 탄성과 소성의 경계점을 의미하고 있으나 일반적으로 P-δ 선도 상의 변곡점 또는 Fig. 6에 표시한 바와 같은 0.2% 변형률 기준으로 구하고 있다. 그렇기 때문에 이미 항복점에서 국부적으로나 표점거리 전 영역에 대해서 소규모 항복이 존재하게 된다. 이상에서 살펴본 바와 같이 이종마찰압접재의 경우 접합계면을 중심으로한 접합영역이 변형 및 파괴거동에 밀접한 관계가 있음을 시사한다고 생각한다.

3-3-2 항복점에서의 네킹(Necking)

Fig. 7은 마찰압접재의 변형거동을 조사한 것으로서 공통적 변형 특징을 시험과정에서 연속적으로 관찰한 예를 표시한 것이다.

일반적으로 변형거동은 소성영역의 구간에서 유효표점길이 내에서는 전단면에 대해서 일정하게 신연이 생기고 최대인장하중하에서 국부적인 단면적의 감소 현상인 네킹 현상이 관찰되기 시작하여 이 부분에서 파단된다고 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 마찰압접재에 대해 관찰해 본 결과 인장하중 하에서의 공통적인 변형거동은 Fig. 7의 a에서와 같이 같이 분명히 항복하중점 즉, 탄소성전이점인 변곡점을 지나면서 네킹이 관찰되기 시작하여 최대인장하중점 까지 단면적이 점차 감소하여 최대인장하중점

에서 최소지름에 이르고 최대인장하중에서 파단점까지는 접합계면을 중심으로 최소지름을 유지한 채 SM15C와 STS304의 시험편길이방향의 신연에 의하여 파단된다.

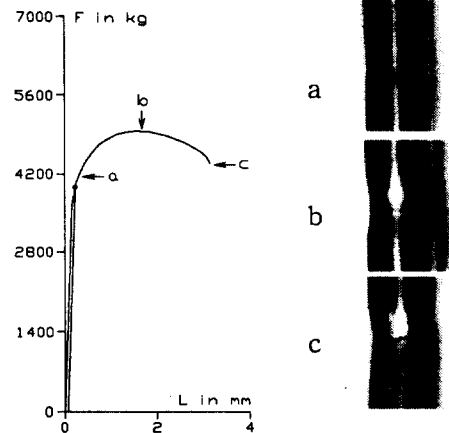


Fig. 7 Behavior of deformation on load-deflection curve

항복점에서 네킹현상이 관찰되는 이유는 접합계면을 포함하는 접합부 주위의 열영향부에서 압접시 발생하는 순간적인 고온에 의한 금속조직 변화와 경도값의 변화에 기인하는 것으로 생각되며 모든 압접재에 이와같은 네킹현상이 존재하는가 하는 것은 앞으로도 많은 연구가 필요하다고 생각된다. 이러한 항복점에서의 네킹현상은 지금까지 타 연구결과에서 찾아볼 수 없으며 마찰압접재의 설계에 새로운 시사점을 주는 것으로 사료된다.

3-3-3. 마찰압접조건에 따른 기계적성질의 거동

Fig. 8은 압접조건을 달리하여 마찰압접한 시험편의 항복강도 및 인장강도를 표시한 그림이다. 항복강도는 Table 3에서 FW1~FW3재의 경우 압접압력이 125MPa이고 시간(t_3)이 0.5~1.2초인데 비하여 FW4~FW7재의 경우 $P_3=162.5MPa$, $t_3=0.5\sim3$ 초인 것을 고려하면 압접시간보다는 압접압력 의존성이 크다는 것을 알 수 있다. 또 인장강도의 경우 압접압력 및 시간의 변화에 비교적 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

인장강도가 압접시간 및 압력의 영향을 거의 받지 않는 이유는 Table 3의 압접조건하에서는 Fig. 4 및 Fig.5에서 알 수 있듯이 열영향부 내의 경도치와 금속조직학적 거동이 거의 일정하기 때문이라고 생각된다. 또 압접압력과 시간은 열영향부의 크기에 영향을 미치고, 이들이 클수

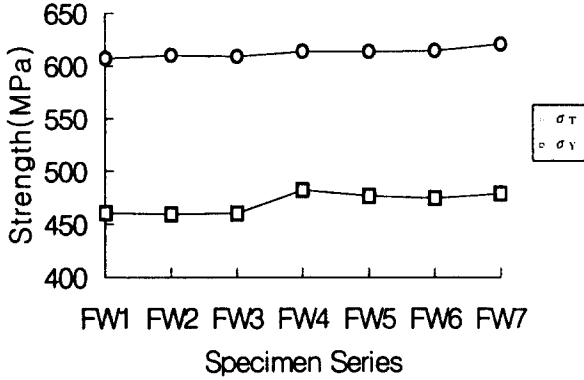


Fig. 8 Behavior of tensile strength and yielding strength by upset pressure

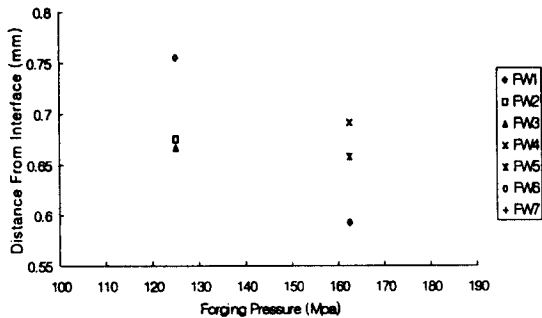
수축 열영향부의 크기는 작게 나타나고, 플래쉬(Flash)가 크게 잘 나타남을 알 수 있다.

3-3-4. 마찰압접조건에 따른 파단면의 위치

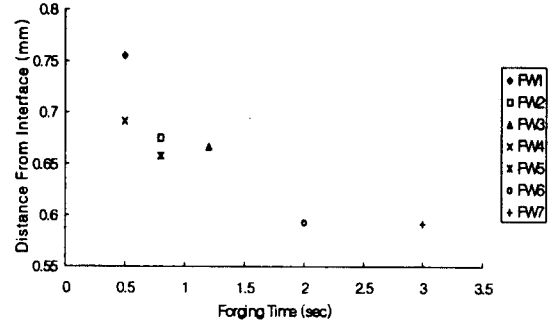
Fig. 9의 (a)는 업셋압력에 따라서 (b)는 업셋시간에 따라서 접합계면에서 파단면까지의 거리를 표시한 것이다.

여기서 알 수 있듯이 업셋압력이 높을수록 파단위치는 계면에서 가깝게 되고 업셋시간이 길수록 파단위치는 계면에 가깝게 되지만 2초이상의 경우 거의 일정하게 나타난다.

파단면의 위치가 업셋압력과 업셋시간의 영향을 받는 이유는 마찰압접시 발생하는 순간적인 고온에 의해 발생



(a) Distance from welding interface to fracture line by forging pressure



(b) Distance from welding interface to fracture line by forging time

Fig. 9 Behavior of distance of fracture line

하는 압접부의 소성유동은 고온에서의 크립(creep) 변형에 해당되고, 이때의 변형은 2초이하의 짧은 시간의 범위 내에서는 응력과 시간의존성이 있음을 알 수 있다. 따라서 발생하게 되는 열영향부의 영역이 업셋압력 및 업셋시간이 증가함에 따라 작아지게 되고, 최소 경도값을 나타내는 위치가 계면에 접근하기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

STS304재와 SM15C재를 업셋압력과 시간을 변화해 가며 마찰압접하고, 정적 인장하중 하에서 접합계면과 계면을 포함하는 주위의 변형 및 파괴거동의 특성을 검토하여 본 결과 중요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 일반적인 경우 최대하중점에서 네킹현상이 관찰되는 것에 비하여 이종마찰압접재의 경우 항복점에서 네킹이 관찰되고, 네킹현상은 네킹부의 지름이 최대인 장하중에 도달할 때까지 점차 감소하여 최대인장하중점에서 최소가 되고 하중의 작용에 의해 길이방향으로 신연되어 최종 파단된다.
2. 충분히 압접된 마찰압접재의 항복강도는 업셋시간보다 업셋압력의 의존성이 있으며 인장강도의 경우는 이들의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.
3. 계면을 포함하는 주위영역의 경도값은 접합계면에서 최대값을 나타내고, 열영향부 내에서 급격히 감소하여 최소값을 나타내고 계면에서 멀어짐에 따라 열영향부의 크기는 업셋시간과 압력의 영향을 받았다가

서서히 모재부의 경도로 회복된다.

4. 마찰압접재의 경우 파단위치는 접합계면을 포함하는 주위영역에서 최소 경도값을 갖는 SM15C의 열영향부에서 파단되고 압력압력과 시간의 영향을 받는다.
5. 마찰압접재의 경우 항복점에서 네킹이 관찰되는 것은 특이한 현상이며 추후 타 경우에 대하여 검토할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. Okita, K., Fukuchi Y., Aritoshi M., 1989, "Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Welded Butt Joints of Free Cutting Stainless Steel", J. of Metals, Vol. 38, No. 432, p. 1035~1039
2. Okita, K., Fukuchi Y., Aritoshi M., Nakayama H., itoga K., 1990, "Resistance to Fracture of Friction Welded Joints", J. of Metals, Vol. 39, No. 445, p. 1431~1437
3. Aritoshi, M., 1993, "Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Pure Aluminum-Formation of Intermetallic Compound at Weld (Report I)", Welding Research Abroad, Vol 39, No. 12, p. 32
4. Yilmaz, Y., 1996, "Investigation into the Weld Zone of Friction Welded C45/HS6-5-2 Dissimilar Steel Joints", J. of materials science letters, Vol. 15, No. 4, p. 360
5. Hazlett, T. H., 1862, "Problem of Friction Welded Plain Carbon and Low Alloy Steel", W. J. No. 2, pp. 49~52
6. Hazlett, T. H., 1862, "Problem of Friction Welded between Dissimilar Metals", W. J, No. 10, pp. 448~450
7. Robertson, A., Cook, M., 1913, The Transition from Elastic to the Plastic State in Mild Steel, Royal Society of London, Series A, Vol. 88, pp. 462~471
8. Hasui, A., 1967, Friction Welding, Japanese Society of Welding Engineering, Vol. 36, No.12, pp. 1275~1286