

이종마찰압접재의 접합계면 및 계면근방에서의 피로균열거동

Behavior of Fatigue Crack at Interface and Around Interface for Friction Welded Dissimilar Materials

오환섭(경희대 기계공학과), 오정국(조선대 기계공학과), 박경식*(경희대 대학원)

Hwan-Sup Oh(Kyung-Hee Univ.), Jeong-kug Oh(Cho-Sun Univ.),

Kyung-Sik Park(Graduate School Kyung-Hee Univ.)

ABSTRACT

In this study behavior of fatigue crack and fatigue fracture is observed under rotary bending fatigue testing in friction welded dissimilar materials. Fatigue fracture most occurred in SM15C heat affected zone around Interface.

In case of fatigue test, stress is reduced the position of fatigue fracture gradually moves to the welded Interface. Micro crack of heat affected zone surface on SM15C is observed at any different stress.

Keywords : Rotary Bending Fatigue Testing(회전굽힘피로시험), Friction Welding(마찰압접), Dissimilar Material(이종재료), Interface(계면), Heat Affected Zone(열영향부), Crack(균열), Fractography(파면해석)

1. 서론

마찰압접은 피접합물의 회전 마찰운동에 의하여 발생하는 기계적에너지(마찰열)로 마찰면을 가열하는 열에너지를 직접 이용하여 접합면을 급속히 가열하고 동시에 가압하여 접합면에 소성변형을 일으키며 접합하는 방법이다. 이 방법은 별도의 외부 에너지등이 불필요하게 되므로 에너지 효율이 높고, 공정의 간편성, 자동화의 용이성, 낮은 비용 등의 면에서 우수한 특징을 가지고 있다. 그러나 현재 이종마찰압접재의 기계적 성질⁽¹⁾, 피로강도⁽²⁾ 및 균열거동⁽³⁾ 등에 대한 연구가 있으나 종래의 탄성론 및 파괴역학의 관점에서 연구되어 해석이 불충분하므로 아직 체계적으로 충분한 해명이 되어있지 않다. 그래서 사용환경이 가혹한 조건이나 신뢰성이 요구되는 분야 등에는 적용이 지연되고 있는 실정이다.

최근 이종마찰압접재의 정적응력하에서의 파괴거동에 관한 연구가 재조명되고 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 따라서 마찰압접의 특성을 유용하게 활용하기 위해서는 종래의 연속체역학을 바탕으로 한 파괴역학적 관점에서 탈피하여 계면역학의 입장에서 파괴거동을 규명하는, 즉 계면파괴에 의한 강도평가 방법이 확립되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 이상의 관점에서 회전굽힘응력하에서 이종마찰압접재의 계면 및 계면근방에서 피로균열 및 피로파괴거동을 규명하기 위하여 냉간압연한 STS304와 SM15C를 마찰압접하여 피로파괴거동을 접합계면을 중심으로 검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2-1. 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용한 실험재료는 일반적으로 내열재로서 많이 사용되는 냉간압연한 STS304와 SM15C를 선정하였고, 화학성분 및 기계적 성질을 각각 Table 1, Table 2에 표시하였다.

Table 1. Chemical composition of material

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	8.19	0.18
Cr	24.39	0.16

Table 2. Mechanical properties of base metal

Material	STS304	SM15C
Yield Strength σ_y	604.0017	680.6178
Tensile Strength σ_B	731.6298	701.8074
Elongation(%)	29.09	7.03
Reduction(%)	77.1994	47.4376
Vickers Hardness (200gr)	257	224

마찰압접을 위한 시료의 치수는 Fig. 1과 같이 지름은 16mm의 것을 사용하고, 압접시 소성유동으로 감소되는 길이의 변화를 고려하여 길이는 STS304의 경우 105mm, SM15C의 경우 110mm로 하였으며 용접후의 길이는 약 200mm가 되도록 하였다. Fig. 2는 압접시 회전에 의한 극성효과를 고려하여 STS304를 회전하고 SM15C재는 고정시켜서 압접한 예로서 SM15C의 flash가 더 많이 생성된 것을 볼 수 있다. 마찰압접은 직접 구동형 습식브레이크식 마찰압접기를 사용하였고, 마찰압접공정은 Fig. 3과 같다.

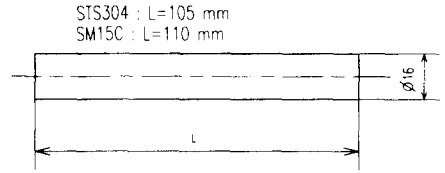


Fig. 1 Specimen for friction welding

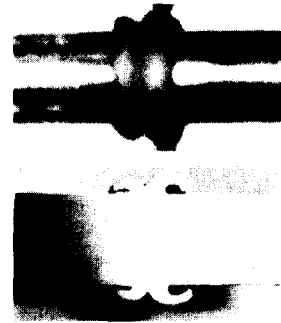


Fig. 2 Friction welded specimen by dissimilar materials

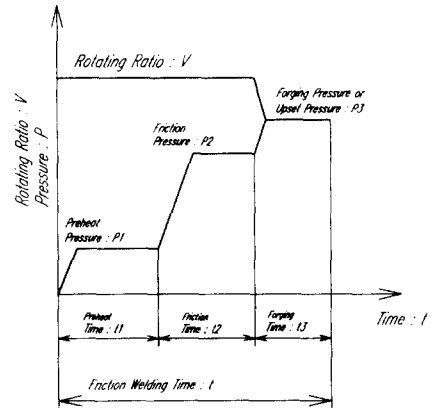


Fig. 3 Schematic illustration of friction welding process

본 연구에서 사용한 이종마찰압접재의 압접조건은 Table 3과 같고, SM15C재를 고정하고 STS304

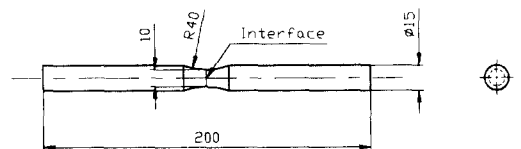


Fig. 4 Rotary bending fatigue testing specimen

재를 시계방향으로 회전·가압하였다. 피로시험편의 형상 및 치수는 Fig. 4와 같다.

Table 3. Condition of friction welding

Preheating Pressure P ₁ (Mpa)	45
Preheating Time t ₁ (sec)	2
Friction Pressure P ₂ (Mpa)	125
Friction Time t ₂ (sec)	0.7
Forging Pressure P ₃ (Mpa)	150
Forging Time t ₃ (sec)	2.5

2-2. 실험방법

본 실험에서 사용한 피로시험기는 Ono's type Rotary bending fatigue testing machine 이다.

시험편의 표면가공은 0.01 μ의 산화알루미나 파우더를 사용하여 Micro-Polishing을 행한 후에 전해연마(전해연마액 - HClO₄ : (CH₃CO)₂O=1 : 10)를 행하여 표면의 가공 결함을 제거하였다. 금속조직의 부식은 SM15C는 Nital 3%의 부식액에 의하였고, STS304는 질산(HNO₃) 5cc, 물(H₂O) 8cc, 염산(HCl) 8cc 혼합용액에 의하였다. 경도시험은 Micro-Vickers 경도기를 사용하였고 시험시 하중은 200gr, 유지시간은 15초로 하였다.

금속조직의 관찰은 광학현미경을 사용하여 관찰하였고 파면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰압접계면 주위의 금속조직

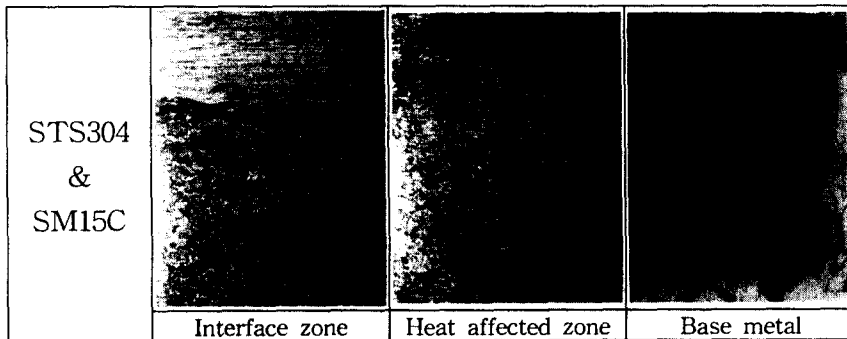


Fig. 5 Microstructure of Interface and SM15C

Fig. 5는 마찰압접재의 대표적인 금속조직인 모재 조직이 미세화 된 것을 알 수 있다. Base material의 모재부, 열영향부, 접합계면을 표시한 것으로서, 냉간압연한 후 열처리과정 없이 마찰압접한 SM15C재의 금속조직을 표시한 것이다.

Fig. 5의 Interface zone은 접합계면을 중심으로 위쪽이 STS304재이고, 아래쪽이 SM15C재이며 SM15C재의 경우 탄화물을 포함하는 Ferrite 조직이 미세화된 것을 알 수 있다.

Heat affected zone은 접합계면에서 약 1mm 정도에서 관찰한 것으로서 열영향부에서의 조직을 관찰한 것이다. 고온의 마찰열에 의하여 Pearlite의 조직이 미세화된 것을 알 수 있다.

Base metal은 모재부의 조직을 관찰한 것으로서 냉간 압연한 모재부의 Grain의 형상 및 방향을 볼 수 있으며 Pearlite와 Ferrite의 분포도를 볼 수 있다.

접합계면은 STS304와 SM15C의 금속학적 성질이 다름에도 불구하고 시험편 중앙부는 축에 직각방향으로 압접되어 있음을 알 수 있다.

3-2. 마찰압접계면 주위의 기계적 성질과 피로하중에 의한 파괴거동

Fig. 6은 접합계면을 중심으로 경도분포거동을 조사한 것을 표시하였다.

경도치는 STS304와 SM15C 접합재의 경우 모재(STS304, SM15C)에 비하여 접합부(접합계면을 포함하는 영역)가 낮으며, 접합부에서는 접합계면의 경도치가 가장 높고 접합계면 주위에서의 최소 경도치를 보이고 있다.

최소경도치가 나타내는 위치는 접합계면을 중심으로 SM15C인 경우 약 0.8mm, STS304의 경우 약 0.2mm정도이며 SM15C의 쪽이 STS304에 비하여 경도치가 낮고 급격히 저하하였다가 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

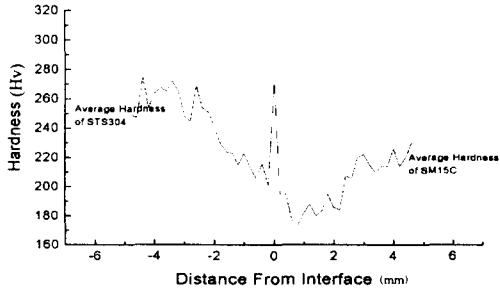


Fig. 6 Hardness distribution of friction welded specimen by Micro-Vickers hardness

3-3. 이종마찰압접재의 S-N curve와 파면특성

Fig. 7은 STS304와 SM15C 이종마찰압접재에 피로하중을 가하여 얻은 S-N 곡선이다. 시간강도영역에서 응력과 파단수명에 대한 직선식은 $\sigma_a = b - a \log_{10} N$ 으로 표시되며 $b=2.686$, $a=0.0383$ 이다. 또 S-N 곡선의 특징은 일반 단일재(SM15C)의 S-N곡선과 비교할 때 단일재의 S-N선도는 유한수명영역에서 곡선인데 비하여 이종마찰압접재는 직선이고, 또 변곡점(nose point)도 일반적으로 $(1\sim 2) \times 10^6$ 회전수명의 범위에 존재하는것에 비해 이종마찰압접재의 경우 약 $(7\sim 8 \times 10^5)$ 회전수명에 있는 것이다. 고응력

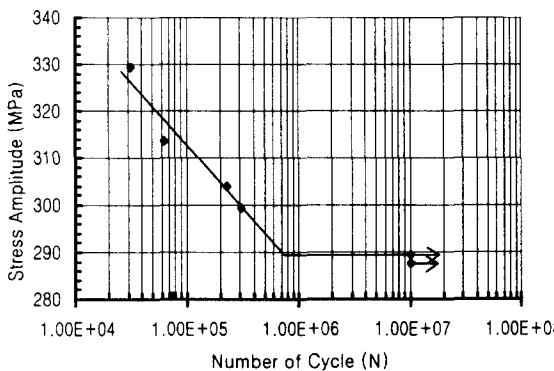


Fig. 7 Diagram of S-N curve

하에서는 파단이 급속히 일어나며, 파단은 소성유동의 영향으로 인하여 접합계면의 열영향부에서 파단이 일어나는 것이 관찰되었으며 응력이 낮아질수록 계면근방으로 파단을 일으키게 되는 것이 관찰되었다.

Fig. 8은 응력에 따른 파단면을 보여주고 있으며 응력이 작아질수록 파단면이 고르며 모든 시료가 SM15C에서 파단되는 것이 관찰되었으며 소성유동층의 영향으로 인한 파면을 볼 수 있다.

Fig. 9는 회전굽힘피로시험에서 응력에 따른 계면에서 부터 파단거리를 나타내주고 있으며 시편의 경도치가 낮은 SM15C에서 파단이 생긴다. 특히 응력이 낮아질수록 피로한도에 가까워 질수록 파단위치는 계면에 가깝게 된다.

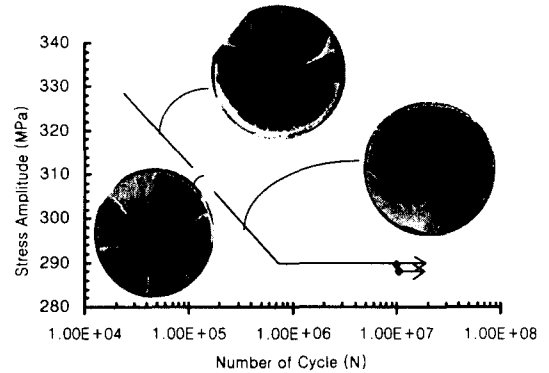


Fig. 8 Fractography of fatigue fracture under variable stress

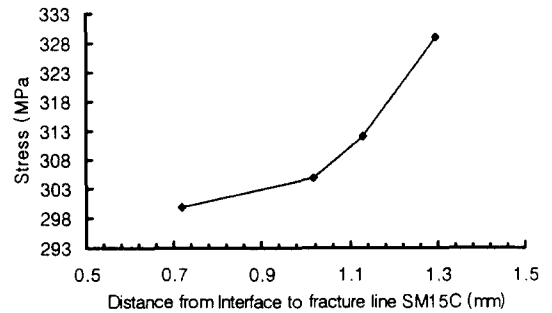


Fig. 9 Relationship between stress and fracture line of SM15C

3-4. 이종마찰압접재의 응력에 따른 피로균열거동

Fig. 10은 STS304와 SM15C 이종마찰압접재의 S-N 곡선(Fig. 7 참조)으로부터 피로한도에 도달한 시험편을 부식전과 부식후의 미소크랙을 관찰한 것이며 반복수 10^7 에서 열영향부 표면의 미소크랙을 보여주고있다.

Fig. 11은 $\sigma = 309(\text{Mpa})$, $N = 4 \times 10^4$ 에서 시험편의 열영향부 표면에 발생된 피로균열의 관찰을 나타낸 것이다. Fig. 11에서는 피로시험시 응력이 매우 크게 달라져도 미소크랙은 SM15C 열영향부에서 발생한다는 것을 관찰할 수 있으며, Fig. 11은 Fig. 10(피로한도)에 비해 응력이 차이가 날 때 시험편의 열영향부 근방에 미소 정류크랙들이 분산되어 있는 것이 관찰된다.

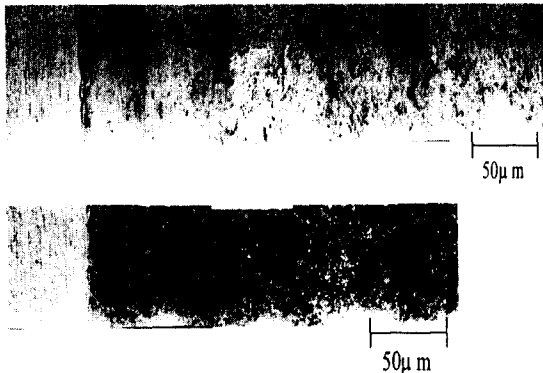


Fig. 10 Surface micro surface crack on Fatigue limits around interface and H.A.Z

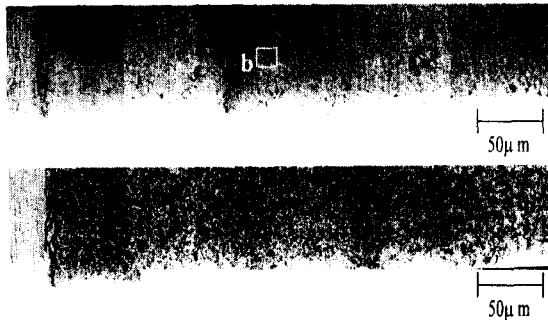


Fig. 11 Photography of micro surface crack on fatigue stress (309 MPa)

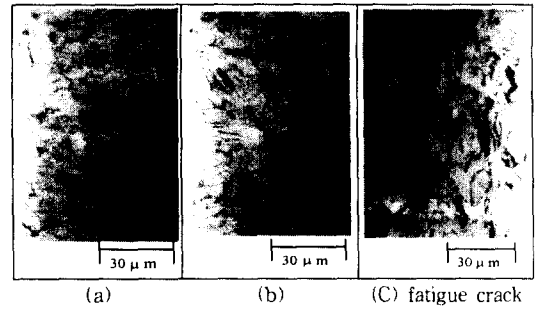


Fig. 12 Photography of micro surface crack at Heat Affected Zone

4. 결론

회전굽힘응력하에서 이종마찰압접재의 계면 및 계면근방에서 피로균열 및 피로파괴거동을 규명하기 위하여 냉간압연한 STS304와 SM15C를 마찰압접 하여 피로파괴거동을 접합계면을 중심으로 검토하였다. 그 결과 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) S-N curve의 특징은 단일재(SM15C)의 S-N 곡선과 비교할 때 단일재의 S-N선도는 유한수명영역에서 곡선인데 비하여 이종마찰압접재는 직선이고, 또 변곡점(nose point)도 일반적으로 $(1 \sim 2) \times 10^6$ 회전수명의 범위에 존재하는것에 비해 이종마찰압접재의 경우 약 $(7 \sim 8) \times 10^5$ 회전수명에 있는 것이다. 또한 본실험에서는 $\sigma_a = 2.686 - 0.0383 \log_{10} N$ 의 시간강도를 나타낸다.

2) 이종마찰압접재의 회전굽힘피로시험시 응력이 감소하면 이것에 비례하여 SM15C재의 열영향부에서 점차 계면쪽으로 과단위치가 천이 된다. 이것은 종래에 고려되지 않았던 결과이며 압접시의 잔류응력의 영향으로 사료되며 앞으로도 지속적인 연구가 필요하다.

3) 이종마찰압접재의 회전굽힘피로시험시 응력이 변화 하여도 SM15C 열영향부 표면에 미소크랙이 밀도있게 분포되어 발생한다. 이것은 이종마찰압접재의 SM15C 열영향부에서 최소 경도치

(계면으로부터 약 0.8 mm)를 나타내는 부위와 금속조직과 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다.

전보⁽⁶⁾에서 행해졌던 시험들 및 피로시험을 통하여 SM15C재의 경도거동이 파단부위와 밀접한 관계가 있음이 규명되었으며 연구가 진행중이다.

참고문헌

- (1) 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, pp. 1431~1437
- (2) K. Okita, Y. Fukuchi, M. Aritoshi, Fatigue Crack Growth Behavior in Friction Welded Butt Joints of Freecutting Stainless Steel, J. of Metals, Vol. 1.38, No. 432, pp. 1035~1039
- (3) 박명파, 1987, 마찰압접한 이종구조용강의 강도 및 피로파괴거동에 대한 연구, 경희대학교 박사학위 논문.
- (4) 오환섭, 오정국, 박준건, 1997, 이종마찰압접재의 정적 인장하중 하에서의 파괴거동, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 247~252
- (5) 오환섭, 오정국, 박준건, 허민구, 1996, STS304 와 SM15C 이종마찰용접재의 변형 및 파괴거동, 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 161~166.
- (6) 오환섭, 오정국, 박준건, 박경식, 1997, 이종마찰압접재의 계면파괴거동, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. II, pp. 604~610