

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.85

자동차 후진기어용 축재(SM 45C-SF 45)의 이중마찰용접 특성[§]

공유식* · 윤성필* · 김선진*†

* 부경대학교 기계공학부

Mechanical Properties of Friction Welded SM 45C-SF 45 Joints for Automobile Reverse Idle Gear Shaft Applications

Yu-Sik Kong*, Seong-Pil Yoon* and Seon-Jin Kim*†

* School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received August 17, 2009 ; Revised November 18, 2009 ; Accepted November 24, 2009)

Key Words: Friction Welding(마찰용접), As-Welded(용접재), Post-Weld Heat Treatment(PWHT, 용접후 열처리), Micro-Virkers Hardness(미소비커스경도), Heat Affected Zone(HAZ, 열영향부)

초록: 자동차 후진기어용 축재는 단조재로서 그 형상은 복잡하고 열처리 및 가공공정이 어려울 뿐 아니라, 제품수명 저하 등의 문제점으로 인한 경제적 손실이 크다. 따라서 종전의 일체형 단조품을 캠 형상 부분만을 기존의 단조품(SF 45)으로 사용하고, 나머지 축 부분은 일반 기계구조용 탄소강재(SM 45C)로 대체를 위한 이중마찰용접을 적용하였다. 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질과의 상관관계를 고찰하였으며, 최적조건에서 마찰용접을 한 후 용접재(as-welded)와 고주파 열처리를 시행한 후열처리재(PWHT)의 접합부 특성을 비교 고찰하였다. 이는 종전의 일체형 단조품에 비해 단조비용 절감, 피로수명향상, 기계가공에 따른 공정수 및 재료절감 등의 경제적 파급효과가 클 것으로 기대된다.

Abstract: Friction welding is a common practice to join axially symmetrical parts for automobile industry applications. The shaft for automobile reverse idle gear is generally produced by forging steel, SF 45. This method is not so good because of high cost of material and production. In this study, in order to investigate the possibility of application of SM 45C to SF 45 dissimilar friction welding, the dissimilar friction welded joints were performed using 20 mm diameter solid bar in forging steel(SF 45) to carbon steel(SM 45C). The optimal friction welding parameters were selected to ensure reliable quality welds on the basis of visual examination, tensile test, micro-Virkers hardness surveys of the bond of area and optical microstructure investigations for welded joint parts. Finally, post weld heat treatment(PWHT) of the high-frequency induction hardening was performed for the friction welded specimens under the optimal welding conditions. And then, the mechanical properties were compared for as-welded and PWHT in SM 45C to SF 45.

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 각종 자동차나 중장비 부품의 축, 그리고 각종 공구류, 기계부품 등의 다양한 산업분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수의 감소, 고가품과 저가품의 이중재 용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성이 좋은 제품의 대량 생산, 자동화의 용이성, 가공시간의 단축, 재료의 절약, 에너지의 고효율화 등에 마찰용접을 적용하려

는 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.^(1,2)

마찰용접은 동종재는 물론 가스용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에서는 곤란한 이중금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있으며, 또한 경제적인 면과 기술적인 측면에서도 많은 장점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하에서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이중금속의 용접에 많이 응용되고 있다.⁽³⁻⁵⁾

자동차 후진기어용 축재는 단조재로서 연평균 생산

§ 이 논문은 2009년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr

개수는 거의 수백만 개에 이르고 있다. 하지만 Fig. 1에 서와 같이 그 형상은 복잡하고 열처리 및 가공공정이 어려울 뿐 아니라, 제품수명 저하 등의 문제점으로 인한 경제적 손실이 크다. 따라서 이러한 문제점의 해결 방안으로 생산업체와 협의하여 종전의 일체의 단조품을 캠 형상 부분만을 기존의 단조품인 SF 45(구 기호임, 신기호는 SF 440)로 사용하고, 나머지 축 부분은 일반 기계구조용 탄소강재인 SM 45C로 대체하여 사용한다면 상당한 경제적 파급효과를 기대할 수 있다.

이상과 같은 산업현장의 관점에서, 본 연구에서는 SM 45C-SF 45의 이종 금속간의 마찰용접을 수행하여 마찰용접 변수인 회전수, 마찰압력, 업셋압력, 가열시간, 업셋시간 등의 상호작용에 의한 용접품질과의 상관관계를 고찰하였으며, 최적조건에서 마찰용접을 한 후 용접재(as-welded)와 고주파 열처리를 시행한 후열처리재(PWHT)의 접합부 특성을 비교 고찰하여 후진기어축의 양산에 주요 자료로 활용하고자 하였다.

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%)

Mat.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
SF 45	-	0.35	0.82	0.19	-	0.14	-	0.15	0.25	Bal.
SM 45C	0.45	0.18	0.67	0.015	0.016	0.15	0.19	0.08	0.19	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Mat.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area ϕ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness (HV)
SF 45	693	400	47.2	26.2	160
SM 45C	846	725	42.5	16.6	220

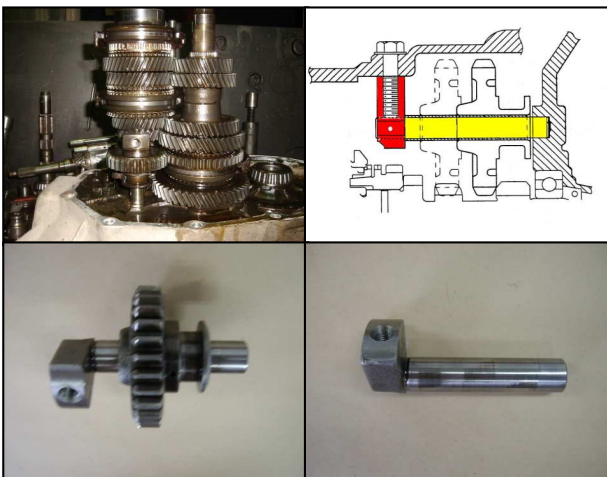


Fig. 1 Shape of reverse idle gear shaft

2. 실험방법 및 절차

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 마찰용접을 위한 실험 재료는 SM 45C와 SF 45 강재이며, 국내 G사의 제품을 사용하였다. 기계구조용 탄소강재(SM 45C)는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, 열간 단조재 SF 45는 내열성, 내마모성 그리고 고온강도 등이 우수하며, 주로 일반기계, 자동차, 항공기 등의 축류, 기어류, 냉간 단조품, 볼트류 등에 많이 사용된다. Table 1과 Table 2에 SF 45와 SM 45C의 화학성분 및 기계적 성질을 각각 나타내었다.

두 이종재료를 각각 직경 20 mm, 길이 80 mm로 가공하였으며, 마찰용접 후 강도를 알기 위한 인장 시험편의 형상과 치수는 KS B0801 14A 규격에 따라 CNC선반 가공 후 연삭하였다. 그리고 경도 및 조직을 조사하기 위해 마찰용접한 후 용접계면에서 좌우 15 mm로 절단하였고, 중심부를 따라서 와이어 절단하였다. 절단시 열영향을 최소화하기 위하여 절삭유를 듬뿍 적용하였고, 마운팅 후 폴리싱하여 미세조직과 미소 비커스경도를 조사 측정하였다. 또한 마찰용접 후 용접부의 강도를 향상시키기 위해 용접후열처리(post weld heat treatment, PWHT)를 하였고, 이는 표면 고주파 열처리(high-frequency quenching hardening)를 시행하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 마찰용접기는 연속구동 브레이크 형식(Model: TOHO TH-25)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축은 $\phi 25$ mm이고 고정축은 $\phi 40$ mm이다. 그리고 이음부의 인장강도 조사에 사용된 인장 시험기는 만능시험기 (Model: KDU-50)로서 인장속도는 2 mm/min으로 각 모재와 용접재 및 후열처리재를 각각 인장시험 하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model: HM-124)를 사용하였으며, 비커스 경도시험은 ASTM E384-05 규격⁽⁶⁾에 준하여 측정자의 오차를 감소하기 위하여 동일 시험자가 경도시험을 수행하였다. 시험하중의 조건은 2.94 N, 가압시간 10 sec, 0.5 mm 등간격으로 측정하였다.

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수 (n), 마찰가열압력(P_1), 업셋압력(P_2), 마찰가열시간

(t_1), 업셋시간(t_2) 등이다. 먼저 참고문헌⁽⁷⁻⁹⁾에 의하여 여러 가지 조건으로 실험 후 가열압력과 업셋압력의 최적조건을 결정하였다. 그리고 이 조건을 기준으로 가열시간 변화에 따른 최적조건과 총업셋량(U_T)의 변화를 조사하였다. 또한 2차 실험에서는 최적압력조건에서 가열시간을 변화시켜 마찰용접 후 용접재의 강도 특성을 비교 검토하였다.

한편, 용접후열처리(PWHT)는 최적 조건에서 마찰용접 후 이 시편을 코일형 고주파 가열장치에 의해 150 kW의 고주파 전력, 주파수 100 kHz로 850-900 °C까지 10 sec간 급속 가열하여 수냉한 다음, 150 °C에서 60 min. 템퍼링 처리한 후 공랭하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수와의 상관성

Fig. 2는 압력변화에 따른 인장강도의 결과를 나타낸다. 먼저 가열압력(P_1)과 업셋압력(P_2), 가열시간(t_1)과 업셋시간(t_2)을 각 4가지 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그림에서 보면 타 조건에 비해 $P_1=70$ MPa, $P_2=140$ MPa, $t_1=5$ sec, $t_2=5$ sec의 인장강도가 694 MPa로 높게 나타났다. 이는 SF45 모재(Base metal, BM)의 인장강도(693 MPa)에 비해 100%에 도달하는 결과이다. 또한 이 결과치는 타 문헌^(7,8)의 결과와도 비교적 일치한다. 따라서 1단계 압력변화의 최적조건을 P_1 과 P_2 를 각각 70, 140 MPa, t_1 과 t_2 를 각각 5 sec로 결정하였다.

Fig. 3은 마찰용접에서 총업셋량과 가열시간과의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 보면 가열시간이 증가할수록 업셋량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 타의 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형적인 증가관계를 나타내는 결과가 많이 보고되고 있다.^(7,8) 여기서 가열시간이 3 sec일 때, 총업셋량은 2.6 mm로 나타났고, 7 sec일 때 7.9 mm, 9 sec일 때 10.1 mm가 실험적으로 얻은 결과이다. 따라서 마찰용접 과정에서의 업셋길이를 조절하여 용접제품의 길이치수 정밀도 등을 요구할 때 이 데이터는 매우 유효할 것으로 판단된다.

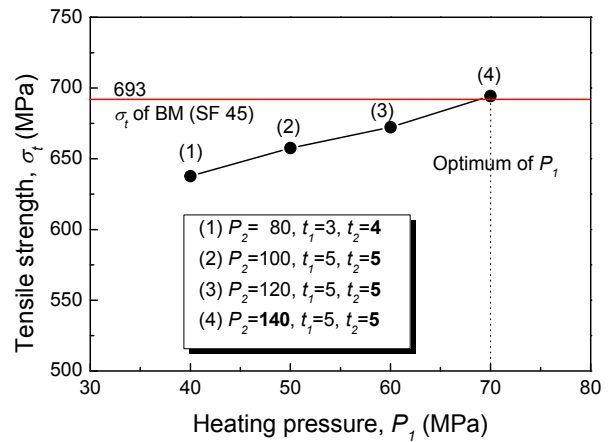


Fig. 2 Relationship between tensile strength and heating pressures for the as-welded

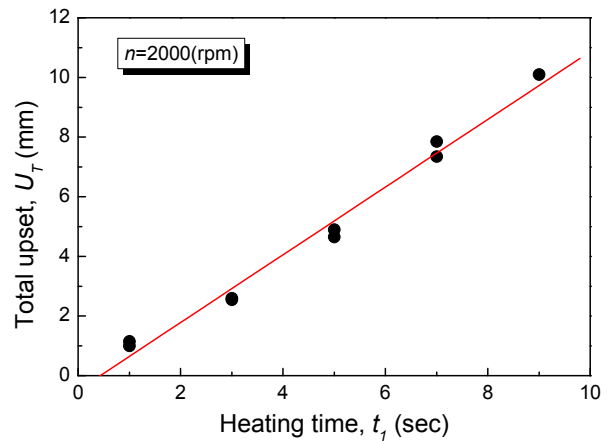


Fig. 3 Relationship between upset length and heating time for the as-welded

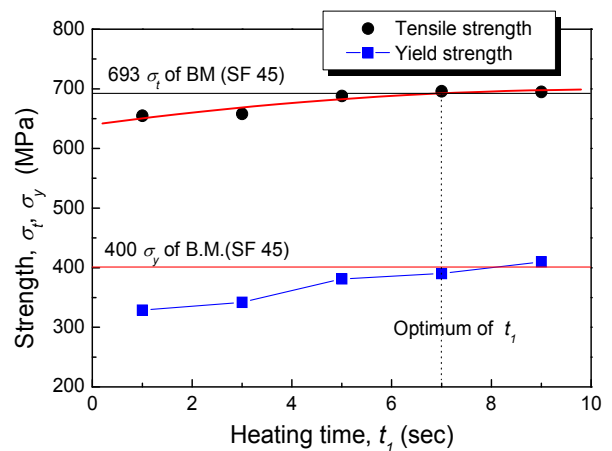


Fig. 4 Relationship between strengths and heating time for the as-welded

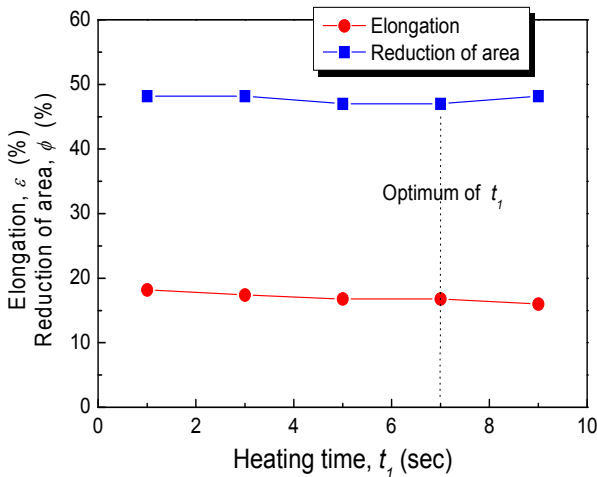


Fig. 5 Relationship between ductility and heating time for the as-welded

3.2 가열시간과의 상관성

Fig. 4는 가열시간과 강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 인장강도는 SF 45 모재의 인장강도(693 MPa)와 거의 비슷하게 나타났으나 가열시간이 증가함에 따라 미세하게 증가하다가 가열시간이 7초일 때 가장 높은 인장강도값을 나타내고 있다. 또한 용접재의 파단위치는 가열시간이 1초와 3초일 때 입열량 부족에 의한 용접계면에서 파단되었으며, 나머지는 두 이종재료 중 비교적 강도가 낮은 SF 45의 모재측에서 일반적인 컵 앤 콘(Cup and cone) 형태의 연성파단되었다. 이상의 결과에서 보면 마찰용접시 건전한 접합이 되는 최적의 범위는 비교적 넓었고, 비교적 높은 용접압력에서의 결과가 실험적으로 우수함을 알 수 있다.

Fig. 5는 가열시간과 연성과의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 조건의 가열시간에서 연신율과 단면수축률의 결과가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 연신율은 약 17%로 SM 45C 모재(16.6%)와 비슷하게 나타났고, 단면수축률은 약 47%로 SF 45 모재(47.2%)의 결과와 비슷하게 나타났다.

따라서 이상의 결과에서와 같이 강도적인 측면과 연성적인 측면을 고려한 SM 45C와 SF 45의 마찰용접재(as-welded)의 최적 마찰용접 조건을 다음과 같이 결정할 수 있었다. 즉, 회전수(n)은 2000 rpm, 가열압력(P_1)은 70 MPa, 업셋압력(P_2)는 140 MPa, 가열시간(t_1)은 7 sec, 업셋시간(t_2)는 5 sec이다.

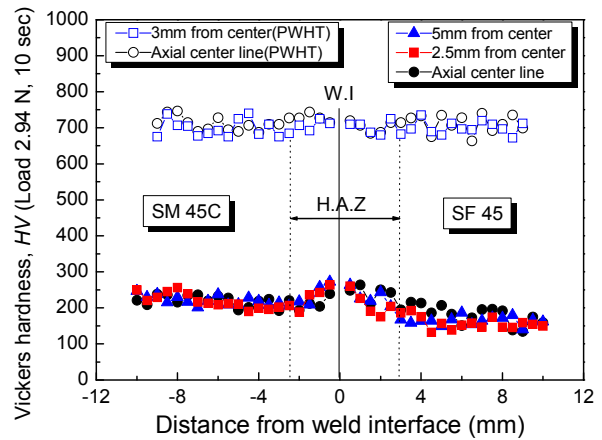


Fig. 6 Hardness distribution of as-welded and PWHT

3.3 경도분포

Fig. 6은 최적 마찰용접 조건에서 용접한 시험편(as-welded)의 미소 비커스경도 분포를 나타낸다. 경도측정은 접합부 중심에서 좌우 0.5 mm 등간격으로 조사하였다. 모재의 경도는 SM45C측이 HV 220으로 SF 45 모재의 HV 160에 비해 높게 나타났으며, 용접계면에서 약 HV 265정도로 가장 높게 나타났다. 이는 용접계면 부근에서 마찰용접시 국부가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다⁽¹⁰⁾. 이러한 용접계면부의 높은 경도치는 용접 후열처리에 의해 완화시킬 수 있다. 또한 열영향부를 두 가지 영역으로 구분하여 보면, 시험편 중심부에서의 열영향부 크기는 SM 45C측 2.5 mm, SF 45측 3 mm로 약 5.5 mm 이고, 센터에서 5 mm 떨어진 지점의 열영향부의 크기는 SM 45C측 3 mm, SF 45측 3.5 mm로 약 6.5 mm로 나타났다.

또한 용접 후열처리재(PWHT)의 경도측정은 중심부와 원주부의 경도를 비교하기 위하여 2가지로 구분하여 측정하였다. 첫 번째는 시험편직경 15 mm의 중심축선상에서 측정하였으며, 두 번째는 이 센터에서 3 mm 지점에서 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 후열처리재의 경도는 약 HV 700으로 열영향부, 모재측 모두 거의 동일하게 나타났다. 이는 용접재(as-welded)와 비교해 볼 때 약 3배 이상의 높은 값으로 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8은 모재(SF 45)와 마찰용접재(as-welded) 그리고 용접 후열처리재(PWHT)의 인장시험 결과를 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 용접 후열처리에 의하여 인장강도와

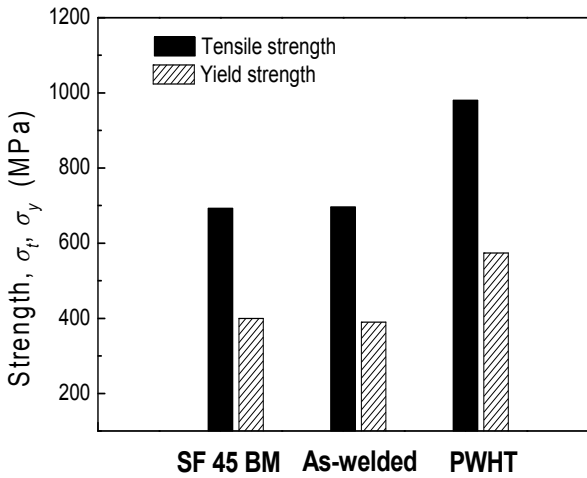


Fig. 7 Comparison of strength for BM, as-welded and PWHT for SM 45C to SF 45

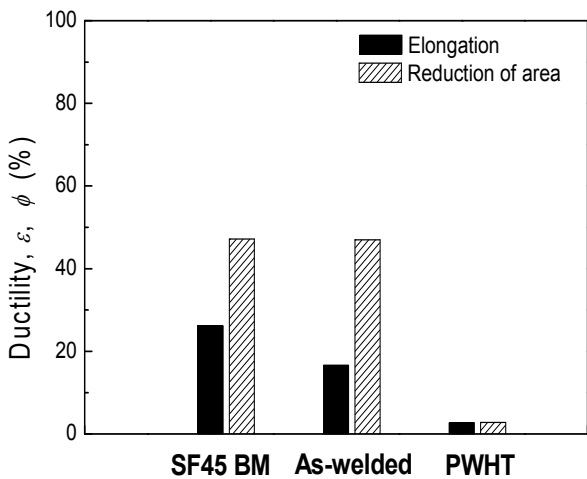


Fig. 8 Comparison of ductility for BM, as-welded and PWHT for SM 45C to SF 45

항복강도는 증가함을 알 수 있었고, 연신율과 단면 수축률은 급격히 감소함을 알 수 있다. 고주파열처리에 의한 후열처리재의 인장강도는 약 1000 MPa로 마찰용접재 보다 약 300 MPa정도 높은 인장강도를 얻을 수 있었으며, 파단면은 고주파열처리의 효과로 인한 취성적인 양상을 보였다. 따라서 실제 마찰용접 적용시에는 후열처리에 대한 정확한 사용조건에 따른 연구도 병행되어야 된다고 사료된다.

3.4 조직관찰

Fig. 9와 Fig. 10은 마찰용접재(as-welded)와 용접 후열처리재(PWHT)에 대한 각각의 광학 현미경 조직사진을 200배의 배율로 관찰하여 나타낸다. 그림에서 용접계면(weld interface, WI) 부근(c)

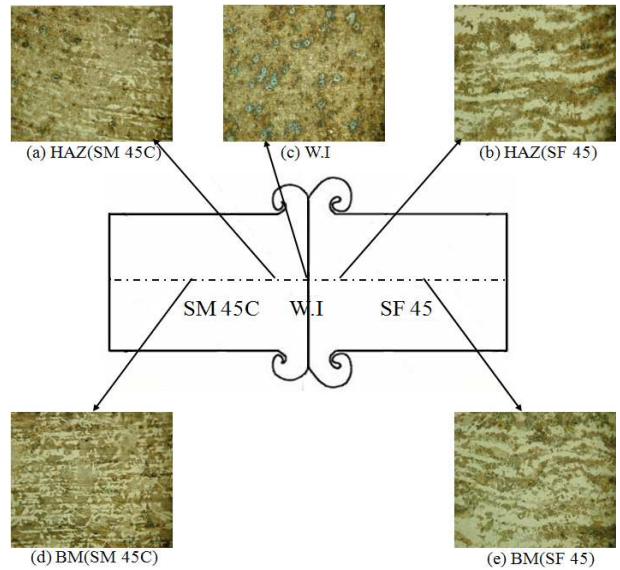


Fig. 9 Optical microstructures of as-welded for SM 45C to SF 45(x200)

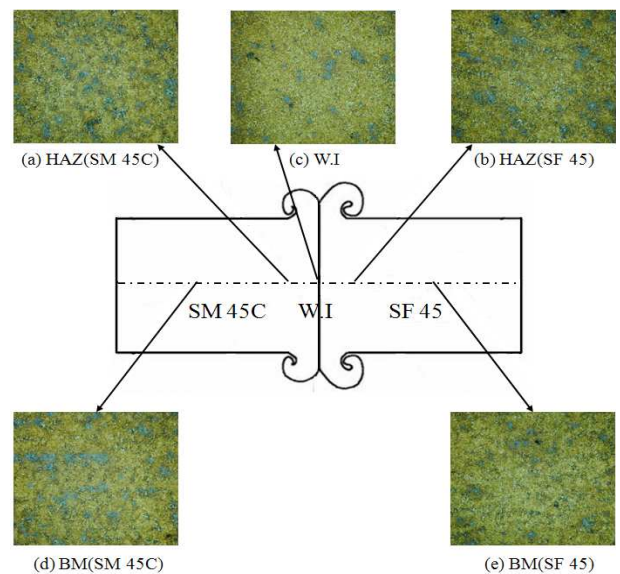


Fig. 10 Optical microstructures of PWHT for SM 45C to SF 45(x200)

에서 두 재료가 강렬히 혼합되어 계면의 형태가 잘 구분되지 않게 나타났다. 이는 두 금속의 결정립이 재결정하여 더욱 미세화 되었다. SM 45C 열영향부(a)는 다소 미세한 결정립 구조를 보이며, 모재부(d)는 펄라이트(pearlite) 조직으로 구성되어 있다. 따라서 최적 조건에서 마찰용접한 용접부의 미세조직은 두 이중재가 강렬히 혼합하여 용융물이나 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직으로 아주 양호한 상태를 알 수 있다.

또한 Fig. 10에서 알 수 있듯이 고주파열처리에

의한 용접 후열처리재(PWHT)의 미세조직은 템퍼된 마르텐사이트(tempered martensite) 조직을 나타내고 있다. 용접계면, 열영향부 그리고 모재 모두 후열처리에 의하여 한층 양호한 조직 상태를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 마찰용접부의 접합 특성을 정확히 평가하기 위해서는 결정립의 미세화, 가공경화, 금속간 화합물, 변형을 완화 등에 대한 금속 조직학적 연구가 차후 병행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

자동차 후진기어용 축에 사용되는 단조품 SF 45와 SM 45C의 이중 마찰용접 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SM 45C-SF 45의 이중 마찰용접재와 후열처리재의 강도와 연성 및 경도분포 등을 고려한 최적 마찰용접 조건은 회전수 2000 rpm, 가열압력 70 MPa, 업셋압력 140 MPa, 가열시간 7 sec, 업셋시간 5 sec의 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 최적조건에서 마찰용접부의 미세조직을 관찰한 결과 두 이종재가 강렬히 혼합하여 접합계면의 형태가 구분되지 않게 나타났으며, 또한 후열처리를 시행하여 용융물이나 입자성장이 없는 한층 양호한 접합상태임을 알 수 있었다.

(3) 종전의 일체형 단조품(SF 45)에 비해, 후진기어 캠 형상 부분은 SF 45로 사용하고, 나머지 축 부분은 SM 45C로 이중 접합하여 양산하게 되면, 단조비용 절감, 피로수명향상, 기계가공에 따른 공정수 및 재료절감 등의 경제적 파급효과가 클 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) KWS, 1998, "Welding · Joining," KWS, pp. 663~664.
- (2) Chung, N. Y. and Park, C. H., 2006, "Establishment

of Fracture Criterion on Friction Welded Dissimilar Materials," *Trans. of KSAE*, Vol. 14, No. 5, pp. 164~171.

- (3) Suh, C. M., Suh, D. Y. and Lee, D. J., 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(1)," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 19, No. 4, pp. 918~928.
- (4) Suh, C. M., Suh, D. Y. and Lee, D. J., 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(2)," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 19, No. 4, pp. 929~940.
- (5) Kang, K. W., Shim, H. J., Lee, B. J., Jhang, K. Y. and Kim, J. K., 2006, "An Analysis for Failure Mechanisms and Strength Evaluation on Brazed Joint," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 10, pp. 1298~1304.
- (6) ASTM, 2005, "ASTM E384-05 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," *ASTM Standard*.
- (7) Kong, Y. S. and Kim, S. J., 2006, "Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 4, pp. 402~408.
- (8) Kong, Y. S., Kwon, S. W. and Kim, S. J., 2006, "Optimization of Dissimilar Friction Welding and Creep Rupture Tests for Nuclear Reactor Component Materials," *Key Engineering Materials*, Vol. 306-308, pp. 1019~1024.
- (9) Chung, N. Y. and Park, C. H., 2006, "Strength Evaluation of Friction Welded SUH35/SUH3 Considering Stress Singularity," *Trans. of KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 59~67.
- (10) Cho, H. S. and Suh, S. J., 1997, "Friction Welding of Inconel 713C and SCM 440," *Journal of KWS*, Vol. 15, No. 6, pp. 78~84.