

## 터빈용 내열강의 이종재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 품질 실시간 평가에 관한 연구(Ⅰ) - 마찰용접 최적화<sup>+</sup>

박형동\*\* · 오세규\* · 권상우\*\*  
(99년 6월 17일 접수)

Study on Dissimilar Friction Welding Optimization of Heat Resisting Steels for  
Turbine and Real-Time Quality Evaluation by Acoustic Emission(1)  
- FRW Optimization

Hyung Dong Park\*\* · Sae Kyoo Oh\* · Sang Woo Kwon\*\*

**Key Words :** Friction Welding(FRW, 마찰용접), Optimization(최적화), Acoustic Emission(AE, 음향방출), Optimum Welding Condition(최적용접조건), Weld Strength(용접강도), Weld Toughness(용접인성), Weld Quality(용접 품질), Real-Time Evaluation(실시간평가)

### Abstract

Taking a view of joining by welding the IN713C to SCM440 and SCM415 steel in production of turbochargers, the friction welding process may be utilized as a new approach for joining them instead of other conventional welding processes. It is because the friction welding has more technical and economic advantages than the other welding processes. As this welding process has the characteristics such as curtailment of production time and materials and cost reduction, etc.. So, this paper deals with determining the proper friction welding condition and analyzing various mechanical properties of friction welded joints of the super heat resisting steel to alloy steel(IN713C to SCM440 and SCM415). And the in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission during friction welding of IN713C to SCM440 and SCM415 steels with higher confidence and reliability has been much required even though it might be the first trial approach for developing it. Then, this first study aimed to develop the optimization of dissimilar friction welding of heat resisting steels (INC713 to SCM440, SCM415) for turbine, considering on strength and toughness.

<sup>+</sup> 본 연구는 1998년도 부경대 대학원생 연구지원비에 의해 수행되었음

\* 종신회원, 부경대학교 공과대학 기계·자동차공학부

\*\* 정회원, 부산기능대학 대학원 기계공학과

## 1. 서론

최근 선진국을 비롯한 각국의 산업발전의 추세에 따라 마찰용접법은 일반 기계부품 및 각종 공구류는 물론 항공기 및 선박용, 부품, 육상기관의 운송기계 부품 등 동종 및 이종 재료의 접합법으로서 타 용접법에 비해 접합성능이 보다 우수하고 기계적인 면과 경제적인 면에서 많은 이점을 지니고 있음이 인정되고 있다. 특히 마찰용접은 기계공업분야에서 복잡한 제품의 단순화에 따른 공정수 감소, 생산원가의 절감을 위한 이종 마찰용접에 의한 경제성 향상, 신속하고 신뢰성 높은 제품을 대량생산하는 등의 접합수단으로 많이 이용되고 있다.<sup>1,2)</sup>

마찰용접법에 대한 연구는 1957년 Vill<sup>3)</sup>에 의해 본격화된 이후 이에 대한 연구보고가 계속 증가하고 있다<sup>4-6)</sup>. 국내에서는 1970년대 초반부터 이종재료에 대한 마찰용접의 최적조건 결정과 응용 등에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>7-12)</sup>. 고속 운송기계기관(항공기, 선박, 자동차, 발전용 디젤 엔진의 과급기)의 핵심요소부품으로서 터빈임펠러(turbine impeller)는 종래에는 일체 단조품 또는 주강품으로 주조 후 기계가공에 의해 제작되었으나, 재료비의 절약과 열처리 공정의 절감을 위하여, 일체품을 분할하는데, 즉 복잡한 정밀 주조품의 고가 초내열재료인 임펠러(IN713C)와 축부의 고강인재(SCM415, SCM440)를 마찰용접(FRW, friction welding)에 의해 고상압접시켜 재료비와 주조비를 크게 감소시킬 수 있다<sup>1,2)</sup>. 그런데, 초내열재료인 IN713C와 축부의 고강인재 SCM415, SCM440과의 이종재료 마찰용접은 쉽지 않다. 이 용접기술은 선진국에서는 부분적으로 연구시도 되어 있으나 국내에는 아직 그렇지 않다. 그런데, 마찰용접기술에 관한 연구<sup>1-12)</sup>가 많이 있지만, 터빈 임펠러의 대량생산중 실시간 품질 평가를 위한 신뢰성 있는 내열강 이종재 마찰용접 최적화 기술이 용접계면의 이음효율 100%이상이 되고, 강도(인장)및 인성(흡수 에너지, 연신률, 단면수축률)을 고려한 것은 국내에서 아직 개발되어 있지 않다<sup>2, 53)</sup>. 또한 이들 재료의 마찰용접중 방출하는 AE(음향방출)에 의해 용접품질에 대한 용접실시간 평가 기술에 관한 연구도 국내외적으로 거의 없다<sup>14-20)</sup>.

이를 해결하기 위해서는 터빈 임펠러 제작 중 실시간 품질(강도, 인성)평가를 위한 이종재 마찰용접재의 강도·인성과 용접중 발생하는 AE총 방출량의 정량적 상관성에 관하여 연구되어야 한다<sup>10-12)</sup>.

본 연구(1)에서는 초내열강(IN713C)과 고강인재(SCM440, SCM415)와의 마찰용접 최적화를 수행하였다. 본 연구의 목적은 각종 운송기계 및 발전기의 설계·제작과 안정성 평가를 위해 그 요소부품인 과급기 터빈 임펠러와 축(stem)간의 이종재 마찰용접 최적화 기술개발에 있다. 본 연구의 기대효과로서 각종 운송기계 설계·제작과 안정성 평가를 위한 요소부품인 과급기 터빈 임펠러와 축간의 접합 최적화 기술 개발 달성에 기여될 것이다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

Inconel 713C(IN713C)재료는 니켈기(Ni-base) 내열합금 가운데 대표적인 초합금(superalloy)의 하나로 고온에서 높은 강도를 유지하고 우수한 내식성과 내산화성을 나타낸다. 온도에 따라 강도가 감소하는 일반 금속재료의 성질과 달리 IN 731C는 약 800℃까지 강도가 증가하는 현상(temperature strengthening)을 보여준다. SCM440은 크롬-몰리브덴 합금강(Cr-Mo alloy steel)으로 대략 480℃ 이상에서 인장강도와 항복점이 급격히 떨어지는 특성을 갖고 있고, 높은 경화능, 높은 피로저항, 내마모성, 내충격성을 가진 Cr-Mo 중탄소강이므로 축재로 많이 쓰인다. SCM415는 주로 표면경화용으로 사용되는 Cr-Mo 저탄소강이다.

Table 1에 사용된 재료의 화학조성과 Table 2에 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials used(wt.%)

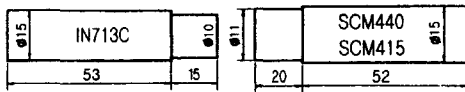
comp. Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb, Ta	Al	Ti	B	Zr	Cu	Co
Inconel 713C	0.14	0.5	0.25		0.003	13.0	1.50	2.30	6.0	0.75	0.01	0.1	0.5	1.0
SCM440	0.38	0.21	0.62	0.017	0.022	1.13	0.30	-	-	-	-	-	0.11	-
SCM415	0.15	0.25	0.73	0.02	0.02	1.05	0.23	-	-	-	-	-	-	-

Table 2 Mechanical properties of materials used

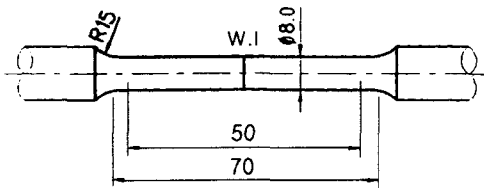
Temp. (°C)	20			500	600	700	
	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
Inconel 713C	757	660	3	750	744	735	720
SCM440	937	815	12	583	389	180	145
SCM415	845	725	13	475	320	150	115

Fig. 1(a)는 마찰용접과 AE시험을 하기 위한 시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

Fig. 1(b)는 마찰용접재의 용접부 인장강도, 인장 흡수에너지, 연신률, 단면수축률을 측정하기 위한 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다.



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Room temperature tensile test specimen

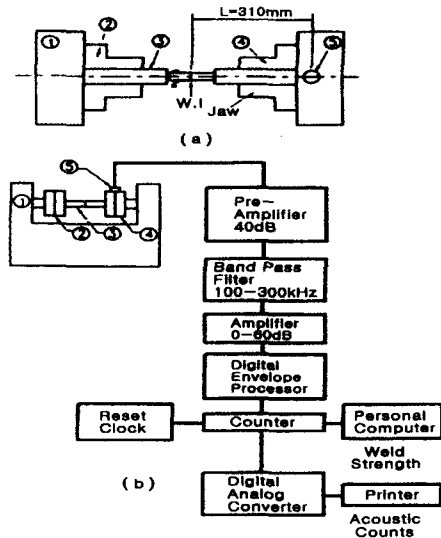
Fig. 1 Shape and dimension of specimens

## 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구중 마찰용접시험에 쓰인 마찰용접 기계는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이다. 마찰용접의 최적화 실험은  $\phi 22\text{mm}$  봉 대 봉 이종재 마찰용접과 AE시험을 수행하였다. 재료의 적정마찰용접 조건을 문헌<sup>2, 13)</sup>을 조사하여 회전수( $n$ )를 결정한 후 마찰가열압력( $P_1$ ), 단조 가압력( $P_2$ )을 계산하여 예비시험을 수행하여 용접조건을 선정하고, 가압시간( $t_2$ )을 선택한 후에 가열시간( $t_1$ )을 다양하게 변화시켜서 마찰용

접을 실시하였다. 마찰용접후 Fig. 1(b)와 같은 시험편으로 선삭가공하고 연삭한 후 접합강도를 알기 위해 만능재료시험기(Toyo Baldwin, UTM25T)로 인장속도  $2\text{mm}/\text{min}$ 으로 인장시험을 하였다. 이 음부의 강도는 인장강도가 모재의 경우보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간  $t_1$  및 총업셋  $U_t$  들을 결정하였다. 그리고 시험 데이터의 분산을 고려해서 예비시험, 마찰용접시험, AE시험 등에 있어서 동일한 조건에 대해 각각 3개의 시험편을 사용하여 데이터의 평균을 구해 데이터 정리 및 커브피팅(curve fitting)하여 실험식을 최소자승법의 회귀해석법에 의해 구하였다. 그리고 95% 신뢰성을 검토하므로써 실험식의 신뢰성을 높였다.

Fig. 2는 마찰용접기계(TOHO TH-25)로부터 변환기를 거쳐 연결된 AE측정 분석 시스템(acoustic emission testing system, PAC Model LOCAN320)의 개략도를 나타낸 것이다.



- ① Brake type friction welding machine
- ② Rotational chuck
- ③ Workpieces
- ④ Stationary chuck
- ⑤ Acoustic emission transducer

Fig. 2 (a) Friction welding and AE transducer location

(b) Block diagram of friction welding AE monitoring equipment and computer aided strength and toughness evaluation

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 과급기 터빈 임펠러재의 이종재 마찰용접의 최적화

##### 3.1.1 마찰용접 조건간의 상관성과 재료의 영향

Table 3은 마찰용접시험에 적용된 용접조건을 나타내었다. Case 1, 2는 최적  $P_1$ ,  $P_2$  결정을 위해 Case 3, 4는 최적  $t_1$ 을 결정하기 위한 조건들이다.

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수( $n$ , rpm), 마찰가열압력( $P_1$ , MPa), 마찰단조가압력( $P_2$ , MPa), 마찰가열시간( $t_1$ , sec), 단조가압시간( $t_2$ , sec) 등이며, 이종재[IN 713C( $\phi 10$ )-SCM440( $\phi 11$ ), IN 713C( $\phi 10$ )-SCM415( $\phi 11$ )]의 마찰용접 최적가열압력  $P_1$ 과 최적가압력  $P_2$ 를 결정하기 위하여 여러 가지 문헌<sup>1-3, 13</sup>과 실험 데이터<sup>7-12</sup>를 참고로 가열시간  $t_1$ 과 가압시간  $t_2$ 를 각각 5sec, 4sec로 정하고 Table 3(Case 1과 Case 2)과 같이 마찰용접 조건( $P_1$ ,  $P_2$ )을 변화 시키면서 마찰용접 하였다. Fig. 3 (a)와 (b)는  $P_1$ 과  $P_2$ 를 결정하기 위하여  $t_1$ ,  $t_2$ 를 고정하고 그때의 인장강도를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 IN713C와 SCM440

의 마찰용접의 경우  $P_1$ ,  $P_2$ 가 각각 140, 180MPa에서 이음효율 100% 이상으로 가장 큰 인장강도 값을 보였다.

그리고 IN713C와 SCM415의 경우는  $P_1$ ,  $P_2$ 가 각각 100, 120MPa일 때, 이음효율이 거의 100%에 가깝게 가장 큰 인장강도를 나타내었고, Fig. 3 (a)와 (b)를 비교해보면, (a)에서 IN713C와 SCM440의 마찰용접의 경우가 (b)의 IN713C와 SCM415의 마찰용접의 경우보다 이음효율 100% 이상되는  $P_1$ ,  $P_2$ 의 범위가 더욱 넓게 나타났다. 이는 SCM440이 SCM415보다 인장강도가 더욱 높고, 탄소량도 더욱 많아서 열영향부의 경도가 더 높아지기 때문으로 생각된다. 그리고 총 업셋량  $U_t$ (mm)와 마찰가열시간  $t_1$ 의 상관관계를 실험한 결과는 Fig. 4 (a), (b)와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 마찰가열시간  $t_1$ 이 증가할수록 총 업셋량  $U_t$ 가 선형적으로 증가하였다. 이것은 타재료의 동종재 및 이종재간 마찰용접에서 공통된 성질이지만<sup>1-3, 7-12</sup>, Fig. 4 (a), (b)에서 처럼 IN713C와 SCM440 및 SCM415의 마찰용접시  $t_1$ 의 증가에 따라  $U_t$ 는 특히 2차함수적으로 증가하였다. 이 이유는 입열량이 증가함에 따라 ( $t_1$ 의 증가에 따라) IN713C의 초내열성 때문에 단조업셋시의 소성에 다소의 저항이 있기때문으로 생각된다.

Table 3 Welding conditions for dissimilar friction welding of bar to bar( $\phi 10$ )

Welding condition Case No	Materials	Rotating speed n(rpm)	Heating pressure $P_1$ (MPa)	Upsetting pressure $P_2$ (MPa)	Heating time $t_1$ (sec)	Upsetting time $t_2$ (sec)	Remarks
1	IN713C-SCM440	2,000	30 60 100 140 160	39 77 120 180 200	5	4	For optimum $P_1$ , $P_2$
2	IN713C-SCM415	2,000	30 50 80 100 140	40 70 100 120 180	5	4	For optimum $P_1$ , $P_2$
3	IN713C-SCM440	2,000	140	180	1 2 3 5 7 8	4	For optimum $t_1$ zone ( $O_{t1Z}$ )
4	IN713C-SCM415	2,000	100	120	1 2 3 4 7 9	4	For optimum $t_1$ zone ( $O_{t1Z}$ )

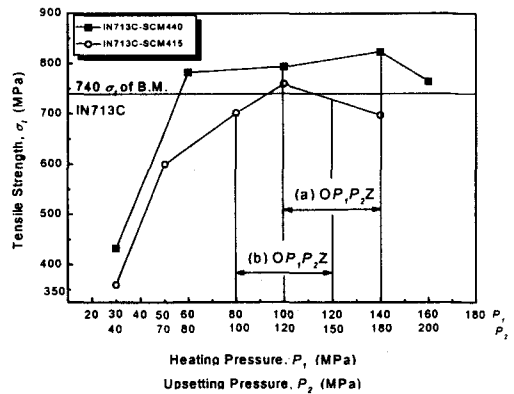


Fig. 3  $\sigma_t$  vs  $P_1$ ,  $P_2$  in FRW of (a) IN713C( $\phi 10$ mm) to SCM440( $\phi 11$ mm) and (b) IN713C( $\phi 10$ mm) to SCM415( $\phi 11$ mm) specimens according to increasing heating and forging pressure  
Welding condition : those of Table 3[Case 1 for (a) and Case 2 for (b)]

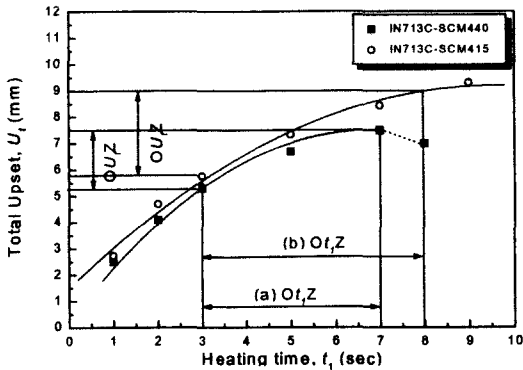


Fig. 4 Relationship between the total upset  $U_t$  and heating time  $t_1$  in bar-to-bar dissimilar FRW of (a) IN713C( $\phi$  10 mm)-SCM440( $\phi$  11mm) and (b) IN713C( $\phi$  10 mm)-SCM415( $\phi$  11mm)  
Welding condition : those of Table 3(Case 3 for (a) and Case 4 for (b))

Fig. 3과 Fig. 4의 그림 (a)와 (b)는 각각 IN713C와 SCM440 및 IN713C와 SCM415의 결합에 의한 마찰용접 결과로서 SCM440 강재가 SCM415 강재보다 인장강도가 92MPa 더 높고(Table 2), C함량도 0.23% 더 높기 때문에(Table 1), 인장파단부가 강도가 더 낮은 IN713측 HAZ 또는 모재부이지만 IN713C-SCM440 마찰용접재의 경우가 용접부 인장강도가 더 높았으며(이음효율 100%이상), 업셋량은 다소 작게 나타났다.

총업셋량(total upset)  $U_t$ 는 마찰가열시간  $t_1$ 동안 가압력  $P_1$ 에 의해 생기는 가열업셋  $U_1$ 과 이때 회전가압마찰에 의해 생긴 열이 단조온도에 달하면 즉시 회전이 정지한 순간 단조가압시간  $t_2$ 동안 단조가압력  $P_2$ 에 의해 단조가압업셋  $U_2$ 가 생겨 결국 이 총업셋량  $U_t$ 가 플래시(flash)로서 소성재료가 용접중심에서 방사선방향으로 밀려나 용접계면 원주상에 링(ring)모양으로 형성되었다. 이때, 용접 중과 직후의 플래시를 관찰해 보면 IN713측이 SCM440보다 훨씬 밝게 보였다. 용접을 완료한 후 플래시의 크기를 비교해 보면 SCM440측이 IN713측보다 훨씬 크다. 이와 같은 플래시의 밝기와 크기의 차이는 모든 용접조건에 대하여 동일한 양상을 띄고있는데 이는 IN713C가 SCM440에

비하여 매우 큰 고온강도를 갖기 때문이다. 즉 고온에서 소성변형에 대한 저항이 IN713측이 SCM440보다 크기 때문에 IN713측 플래시 생성량이 작고, 따라서 열전달 계수가 유사할 경우<sup>29)</sup>, 마찰열의 소산(dissipation)이 IN713측이 보다 작게되므로, 플래시의 온도 또한 높아 밝게 보인다. 그리고 IN713측 플래시는 축방향 균열이 관찰되는데, 이 균열은 마찰단계에서는 나타나지 않고 가압력이 짧은 시간동안 급격히 증가하는 업셋단계에서 발생하였다. 이것은 평단조에서 원주형시편을 고압하에서 큰 변형률 속도로 업셋팅(upsetting)할 때 생기는 압축방향 균열과 동일한 기구에 의해 만들어지는 것으로 생각된다. 열전달의 균형을 위하여 본 실험에서는 IN713측 시편 지름을  $\phi$ 10mm, SCM440과 SCM415측 지름을  $\phi$ 11mm로 하여 마찰용접하므로써, 플래시 균열이 없는 매끈한 형상으로 될 수 있었다.

### 3.1.2 마찰용접조건과 용접 품질(인장강도)과의 상관성

Table 3(Case 3과 Case 4)과 같은 조건에서 IN713C-SCM440 및 IN713C-SCM415를 마찰용접한 결과 앞서 Fig. 3 (a), (b)에서 인장강도  $\sigma$  (MPa)와 마찰가열압력( $P_1$ ), 마찰단조가압력( $P_2$ )과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 보여 주었다. Fig. 3의 결과로부터 구한 마찰가열압력( $P_1$ )과 마찰단조가압력( $P_2$ )을 IN713C-SCM440의 경우 각각 140, 180(MPa),  $t_2=4$ (sec)로 하고 또한 IN713C-SCM415의 경우 각각 100, 120(MPa)로 하여 마찰가열시간( $t_1$ )을 변화시키면서 마찰용접과 AE시험을 수행한 후, 마찰가열시간과 인장강도와의 상관성을 나타낸 그래프가 Fig. 5 (a) 및 (b)이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 적당한 가열시간 범위에서는 이종재 중 낮은 쪽 인장강도를 갖는 IN713C( $\sigma_t=740$ MPa)보다 모두 높았다. 인장파단은 모두 IN713측 모재부에서 파단 되었다. 마찰가열시간  $t_1$ 이 증가함에 따라 인장강도가 증가하여 (a)  $t_1=3\sim 7$ sec사이, (b)  $3\sim 8$ (sec)사이가 가장 양호한 조건으로 나타났다.  $t_1$ 이 낮은 경우는 용접재가 불완전한 용접이고 가열시간이 짧아 충분한 입열량 효과를 얻기 힘들기 때문에 인장강도는 낮게 나타났다,  $t_1$ 이 증가함에 따라 입열량 영향에 의해 인

장강도가 증가하다가  $t_1=5\text{sec}$  이상에서는 인장강도가 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 가열을 오래 지속시키면 입열량이 과도하게 되어(냉각속도가 더 느려짐) 시편자체의 열전도에 의한 강도증가의 열효과를 충분히 기대하기 어렵기 때문으로 생각된다.

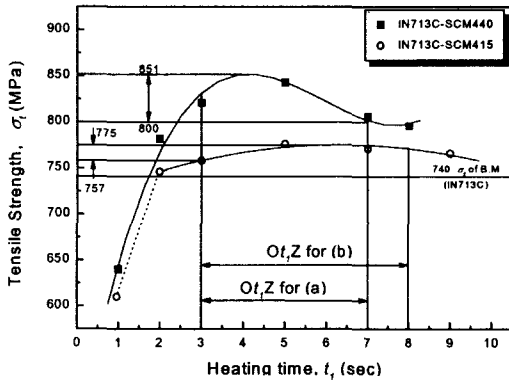


Fig. 5  $\sigma_t$  vs  $t_1$  of bar to bar dissimilar FRW joints of (a) IN713C to SCM440 and (b) IN713C to SCM415  
Welding condition : Case 3 for (a) and Case 4 for (b) of Table 3)

따라서  $Opt_tZ$ (optimum  $t_1$  zone) (by  $\sigma_t$ )에 의해 최적 가열시간은 (a)  $t_1=3\sim 7\text{sec}$  및 (b)  $t_1=3\sim 8\text{sec}$ 이며 이때의 인장강도는 (a)  $\sigma_t=800\sim 851\text{MPa}$ (이음효율 108%~115%), (b)  $\sigma_t=757\sim 775\text{MPa}$ (이음효율 102~105%)이고, 총입열량은 각각 (a)  $U_t=5.5\sim 7.5\text{mm}$ , (b)  $U_t=6\sim 9\text{mm}$ 를 나타내고 있다. 따라서  $\phi 10\text{mm}$ 와  $\phi 11\text{mm}$ 의 IN713C-SCM440의 적정 마찰용접조건은 회전수  $n=2000\text{rpm}$ , 마찰가열압력  $P_1=140\text{MPa}$ , 마찰단조가압력  $P_2=180\text{MPa}$ , 마찰가열시간  $t_1=3\sim 7\text{sec}$ , 마찰단조가압시간  $t_2=4\text{sec}$ 라 할 수 있고, IN713C-SCM415의 경우는  $n=2000\text{rpm}$ ,  $P_1=100\text{MPa}$ ,  $P_2=120\text{MPa}$ ,  $t_1=3\sim 8\text{sec}$ ,  $t_2=4\text{sec}$ 로 결정지을 수 있다.

마찰용접부의 인장강도  $\sigma_t(\text{MPa})$ , 마찰가열시간  $t_1(\text{sec})$ 과의 사이에는 정량적 상관성이 존재한다. 이때,  $\sigma_t-t_1$  상관관계식은 다음과 같이 전산되었다.

IN713C - SCM440 :

$$\sigma_t = 449.2 + 237.77t_1 - 44.3 t_1^2 + 2.5 t_1^3, \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

IN713C - SCM415 :

$$\sigma_t = 713.8 + 19.43t_1 - 1.53 t_1^2, \quad (R^2=0.95) \quad (2)$$

여기서,  $R^2$ 은 기여율(coefficient of determination)을 나타낸다. 이때 R은 중상관계수(重相關係數, multiple correlation coefficient)라 한다.  $R^2$ 이 1에 가까울수록 그 상관식은 95%이상으로 더욱 신뢰성이 높아진다<sup>7~12)</sup>.

### 3.1.3 마찰용접조건과 용접부 인성(흡수에너지, 연신률, 단면수축률)과의 상관성

마찰용접의 최적화를 위하여, 이음부의 강도(이음효율 100% 이상)와 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신률)의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 Table 3(Case 3 및 Case 4)의 마찰용접 조건에 따라 IN713C와 SCM440 및 IN713C와 SCM415를 마찰용접 할때 마찰가열시간  $t_1$ 에 대한 마찰용접부의 인장흡수에너지  $E$ , 단면수축율  $\epsilon$  및 연신률  $\epsilon$ 과의 상관관계는 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)와 같다.

Fig. 6에서 IN713C-SCM440과 IN713C-SCM415의 마찰용접부의 연신률과 인장흡수에너지 그래프를 보면 인장과단부가 IN713C측 HAZ 또는 모재부이므로 거의 일정한 값으로 나타났다.

단면수축률은 용접조건  $t_1$ 의 증가에 따라 가열로 인한 연화성 때문에 대체로 증가하다가 Fig. 5에서 구한  $Opt_tZ$ 의 범위에서 큰 변화없고, IN713C-SCM415의 경우  $t_1=5\text{sec}$ 에서 약간의 증가 피크(peak)가 발생하였다.

따라서 마찰용접부의 인성(인장흡수에너지, 연신률, 단면수축률)을 고려했을 때도 Fig. 5에서 인장강도에 의해 구한 마찰용접 최적마찰가열시간  $t_1$ 의 범위  $Opt_tZ$ 가 각각 3~7sec, 3~8sec인 것은 매우 적합한 조건임이 확인되었다.

Fig. 6 (a)와 (b)를 비교해보면, (a)에서 처럼 IN713C와 SCM440의 마찰용접재의 경우가 (b)의 IN713C와 SCM415의 마찰용접재의 경우보다 인성이 다소 떨어진 것은 Fig. 5 (a)와 (b)의 인장강도가 서로 반대로 용접재 IN713C-SCM440의 경우가

높고 용접재 IN713C-SCM415의 경우가 더 낮기 때문이다. 즉 SCM440이 SCM415보다 강도는 높으나 인성이 떨어지는 이유로 설명될 수 있다.

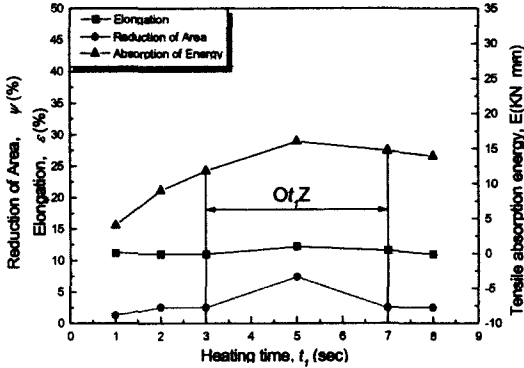


Fig. 6 (a)  $E$  vs  $t_1$ ,  $\epsilon$  vs  $t_1$  and  $\psi$  vs  $t_1$  of friction welded joints of IN713C-SCM440 ( $\phi$  10mm bar-to- $\phi$  11mm bar) Welding cond. : as shown in Table 3(Case 3)

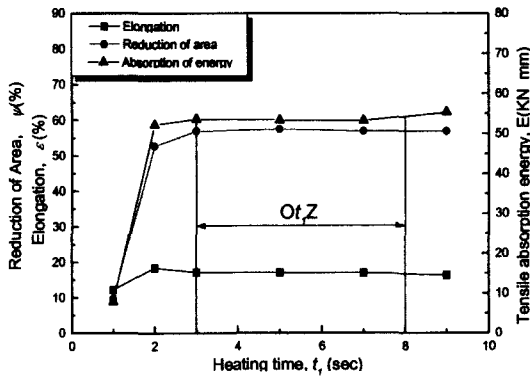


Fig. 6 (b)  $E$  vs  $t_1$ ,  $\epsilon$  vs  $t_1$  and  $\psi$  vs  $t_1$  of friction welded joints of IN713C-SCM415 ( $\phi$  10mm bar-to- $\phi$  11mm bar) Welding cond. : as shown in Table 3(Case 4)

### 3.1.4 용접부의 경도분포와 미시조직 검사

Fig. 7은 최적 마찰용접 조건하에서 IN713C와 SCM440을 마찰용접한 시험편의 표면에서 2.5mm 깊이의 마찰용접부 종단면의 경도 분포를 나타낸다. 이 그래프를 보면 용접면(weld interface)에서 경도치가 최고이다. 그 이유는 용접면 부근에서 마

찰용접시 국부 가열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 모재의 경도는 각각 Hv425, Hv260정도로서 매우 낮고 마찰용접 경계면 (W.I.)의 경우는 Hv510정도로서 SCM440의 모재부 경도 Hv260보다 약 96%정도 상승했으며 HAZ(heat affected zone)는 경계면에서 좌우 약 2mm정도로서 매우 좁다.

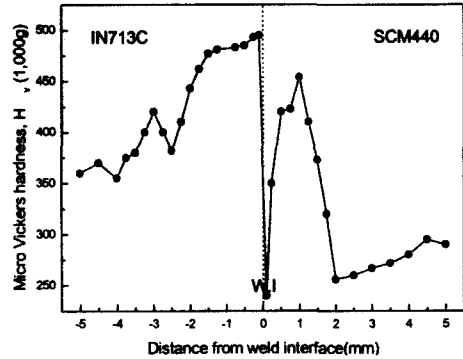


Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of friction-welded-joint of IN713C to SCM440 steel bars ( $\phi$  10 to  $\phi$  11) Welding cond. :  $n=2,000$  rpm,  $P_1=140$ MPa,  $P_2=180$ MPa,  $t_1=5$ sec,  $t_2=4$ sec

SCM440측의 HAZ경계부에 마찰열에 의한 연화 작용에 의하여 경도의 급저하부(hardness valley)가 있었으며, 인장시 균열개시점이 중심부의 경도 급저하부가 된다. 용접계면에서 IN713C측은 마르텐사이트 조직으로 경화되어 경도의 피크(peak)가 나타난다. 이러한 경도의 피크는 후열처리로써 완화시킬 수 있다<sup>12~20)</sup>.

Fig. 8은 최적 조건하에서 마찰용접한 IN713C-SCM440 용접재 시험편을 가공하여 모재와 열 영향부(HAZ) 및 마찰용접부의 조직을 검사코져 중심 축선으로 절단한 종단면에서 마찰용접계면(W.I.)과 좌우 모재부근의 조직 사진이다. 인장파단은 대부분이 인장강도가 낮은 IN713C 모재와 HAZ측에서 파단되므로 W.I.부의 미시조직 결합은 없다고 생각된다.

Fig. 8에서 용접계면에서 멀리 떨어진 IN713C 모재측은 오스테나이트(austenite)기지에 입상탄화물 조직이며, SCM440 모재측은 페라이트(ferrite)

와 펄라이트(pearlite)의 혼합조직을 이루고 있다. IN713측의 HAZ부는 오스테나이트거지에 입상 석출탄화물이 나타나 있으며, SCM440측의 용접계면에 가까운 HAZ부는 마르텐사이트(martensite)와 베나이트(bainite)의 혼합조직으로 되어 있으며, 마찰용접에 의한 용접부의 조직상의 결함은 전혀 발견되지 않았다.

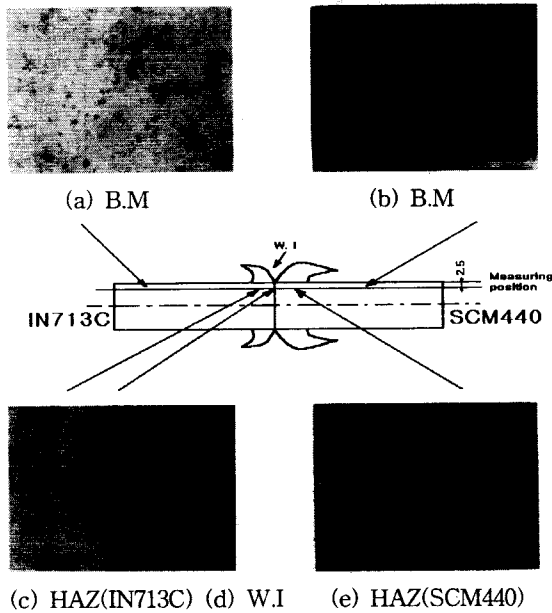


Fig. 8 Micro-structures of B.M, HAZ and weld interface of friction welded joint of IN713C to SCM440 steel bar ( $\phi 10$  to  $\phi 11$ ) ( $\times 400$ )  
 Welding cond. :  $n=2,000\text{rpm}$ ,  $P_1=140\text{MPa}$ ,  
 $P_2=180\text{MPa}$ ,  $t_1=5\text{sec}$ ,  
 $t_2=4\text{sec}$

#### 4. 결 론

터빈임펠러용 내열강 IN713C( $\phi 10\text{mm}$ )와 고강 인성 축용 Cr-Mo강인 SCM440 및 SCM415강재( $\phi 11\text{mm}$ )와의 이종재 마찰용접 최적화를 용접부의 이음효율 100%이상이 되고 강도와 인성을 고려하여 연구한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) IN713C와 SCM440 및 IN713C와 SCM415강재와

의 이종재 마찰용접 최적화 기술이 개발되었다.

- 2) IN713C-SCM440의 마찰용접 최적조건은 강도와 인성을 고려하여  $n=2,000\text{rpm}$ ,  $P_1=140$ ,  $P_2=180\text{MPa}$ ,  $t_1=3\sim 7$ ,  $t_2=4\text{sec}$ 이며, IN713C -SCM415의 마찰용접 최적조건은  $n=2,000\text{rpm}$ ,  $P_1=100$ ,  $P_2=120\text{MPa}$ ,  $t_1=3\sim 8$ ,  $t_2=4\text{sec}$ 임이 실험적으로 확인되었다.
- 3) 인장파단은 IN713C HAZ측 또는 모재측에서였으며, 용접부 경도와 조직검사결과는 용접계면에서 멀리 떨어진 IN713C 모재측은 오스테나이트거지에 입상탄화물 조직이며, SCM440 모재측은 페라이트와 펄라이트의 혼합조직을 이루고 있다. IN713C측의 HAZ부는 오스테나이트거지에 입상 석출탄화물이 나타나 있으며, SCM440측의 용접계면에 가까운 HAZ부는 마르텐사이트와 베나이트의 혼합조직으로 되어 있으며, 마찰용접에 의한 용접부의 조직상의 결함은 전혀 발견되지 않았다.

#### 참고문헌

- 1) AWS, "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, pp.32-34, 46, 145-150, 184, 1979
- 3) Vill, V. I., "Friction Welding of Metals", Svarochoe Proizvodstvo, 3, pp.19-23, 1962
- 4) Tasako, Y. and N. Nakayama, "Friction Welding of Ni-based Super Alloyed Nitriding Steel", J. Prec. Mech. Mar., 36, pp.707-711, 1970
- 5) Okita, K. and W. Kishimoto, "Studies on Friction Welding of SUS304 Austenitic Stainless(Report I)", J. Weld. Soc. 48, pp.991-995, 1979
- 6) Um, D. S. and S. W. Kang, "Study on Fatigue Strength of Friction Welding S20C and SUS27B", J. SNAK, 8, pp.13-24, 1971
- 7) Oh, S. K., "Study on Friction Welding of Valve Materials SUH3-SUH31", J. Korean Soc. of Mech. Eng., 14, pp.221-232, 1974
- 8) Oh, S. K., S. D. Han and U. J. Lim, "Effects



- of Postweld Aging Treatment on Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature", J. Korea Society of Marine Engineers, Vol. 7, No. 2, pp.36-49, 1983
- 9) Oh, S. K., K. Y. Lee and H. J. Kim, "A Study on Fatigue Strength of Friction-Welded Heat-Resisting Steels at High Temperature (1)", Proc. KSME June, pp.130-138, 1980
  - 10) Oh, S. K., "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and Inprocess Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Technique", Ph.D. thesis, Keio University, Part I, pp.27-42, pp.73-84, pp.85-98, pp.122-134, 1982
  - 11) Oh, S. K., "Application of Friction Welding for Parts of Industrial Machinery", 한국박용기관학회지, 10권, pp.32-34, 1986
  - 12) Oh, S. K., A. Hasui, T. Kunio and K. K. Wang, "Effects of Initial Energy of Acoustic Emission Relating to Weld Strength in Friction Welding", Proc. of 4th, Sym. JWS, in Osaka, pp.1~134, pp.147-314, pp.713-718, 1982
  - 13) 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", pp.31, 1984.
  - 14) Spanen, J.C., "Acoustic Emission Techniques and Application", ASNT. 1974
  - 15) Oh, S.K., A. Hasui, T. Kunio, K.K. Wang, "Effects of Initial Energy on Acoustic Emission Relating to Weld Strength in Friction Welding", Transactions (in English) of Japan Welding Society, Vol.13, No.2, pp.15-26, 1982
  - 16) Oh, S.K., K.K. Wang, G.R.Reif, "In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques", Welding J. of American Welding Society, Welding Research Supplement, Vol.61, No.9, pp.312-316, 1982
  - 17) Oh, S.K., "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of KSME, Vol.22, No.3, pp.184-190, 1982
  - 18) Oh, S.K., "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of KSME, Vol.7, No.2, pp.221-232, 1983
  - 19) 오세규, "마찰용접기계의 자동생산 품질제어 실시간 평가", 대한기계학회 논문집, 9-6, pp.757-766, 1985
  - 20) 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
  - 21) Rothman, M F., "High-Temperature Property Data : Ferrous Alloys", ASM International, pp.310, 1984