

Ti와 STS 321 마찰압접부의 기계적 특성 향상을 위한 최적 접합 조건

김 성 연*

*한국해양대학교 산업기술연구소

Optimal Welding Parameters of Improving Mechanical Properties for Titanium-STS 321 Friction Welded Joint

Seong-Yeon Kim*

*Research Institute of Industrial Technology, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 일정한 업셋 압력 하에서는 마찰 시간 증가에 따른 인장 강도의 변화는 거의 없지만, 마찰 시간을 일정하게 한 후 업셋 압력을 증가시키면 인장 강도는 업셋 압력에 비례하여 증가하였다. Ti 와 STS 321 접합부의 인장 파단 위치는 접합계면에 가까운 Ti 모재부에서 발생하였다. 용융접합법에 비해 낮은 입열량을 가지는 마찰압접은 열영향부에서 상대적으로 적은 야금학적 변화를 가지는 것으로 기대된다. 게다가 고상상태의 용접이기 때문에 STS 321에서 문제가 되는 고온 균열과 관련된 문제를 막을 수 있다. 이러한 장점들로 마찰압접이 많은 응용분야에서 Titanium-STS 321 접합에 적용될 것이다.

핵심용어 : 마찰 시간, 업셋 압력, 야금학적 변화, 고상 상태

abstract Under the constant upset pressure, the tensile strength make a little difference with an increase in friction time. At the constant friction time, the tensile strength increased with an increase in upset pressure. The tensile strength fracture of Ti to STS 321 joint occurred in Ti base material near interface. The lower heat inputs associated with FW(relative to fusion welding process)are expected to produce less severe metallurgical changes in the HAZ. Additionally, problems with hot cracking in STS 321 should be eliminated due to the solid-state nature of the process. These advantages will make FW attractive for joining of Titanium-STS 321 in many applications.

Keywords : Friction time, Upset pressure, Metallurgical change, Solid-state nature

1. 서 론

근래 스테인리스강의 수요가 증가하는 추세에 따라 스테인리스강의 생산 기술 연구는 국내외적으로 활발히 이루어지고 있지만 대형 기계 구조물의 접합과 같은 가공 기술에 대한 신뢰성, 품질 향상 등에 대한 연구 결과는 부족한 실정이다. 스테인리스강은 내식성이 요구되는 용도 뿐만 아니라 고온, 고압 및

저온 환경 등의 사용 분야가 광범위하다[1]. 최근에는 극한 환경이 요구되는 심해, 극지 또는 우주 항공 재료 및 원자력 발전 등으로 그 적용 범위가 확대되고 있다[2]. 그 중에서도 오스테나이트계 스테인리스강은 연강의 30% 정도의 낮은 열전도도를 갖기 때문에 용접성이 우수하여 그 활용 범위가 넓다. 그러나 용접시공 후의 접합부는 대략 450~850°C의 온도 구간에서 발생하는 입계 예민화

* kimsy@hhu.ac.kr, 051)410-4175

Ti와 STS 321 마찰압접부의 기계적 특성 향상을 위한 최적 접합 조건

(sensitization) 로 인하여 내식성 저하와 기계적 성질의 열화는 불가피하다[3]. 따라서 이를 방지하기 위해 Ti 와 Cd 같은 원소를 첨가하여 안정화 처리한 강종도 사용되지만 첨가 원소의 양이 미량이고 용융접합시 용융열에 의한 증발등과 같은 원인으로 만족스러운 품질을 기대할 수 없다[4]. 또한 용융접합에 의해 모재와 용접부의 조직 차이가 크게 되어 HAZ (Heat Affected Zone)에 잔류 응력이 집중하여 다른 부위에 비해 높은 경도값을 갖게 되며 또한 상대적으로 포텐셜이 낮아 부식 속도가 증가하여 동일한 조건하에서 용접부의 HAZ가 가장 심한 부식을 일으킨다[5]. 따라서 기존의 TIG, MIG, 브레이징 등 용융 용접에 의한 오스테나이트계 스테인리스강 접합체의 HAZ에서의 기계적 특성 저하는 필연적이며 이러한 문제점은 모재를 용융시키면서 접합을 행할 경우 피할 수가 없다. 따라서 모재를 용융시키지 않으면서 접합이 가능한 고상접합법의 일종인 마찰압접을 스테인리스강의 접합에 적용하면 용융 접합시에 생기는 주조 조직의 발생을 억제하며 HAZ의 크기 또한 최소화하여 잔류 응력 집중 등에 의한 내식성과 기계적 특성 저하를 피할 수 있어, 스테인리스강 고유의 내식성 및 우수한 기계적 특성을 유지할 수 있다. 또한 마찰압접의 경우 서로 다른 이종 재료의 접합도 가능하여 외국의 경우 스테인리스강과 비철 재료간에 접합을 시도한 연구가 활발히 진행되는 것으로 보고되고 있다 [6][7]. 그러나 국내의 경우 마찰압접법에 의한 스테인리스강 접합에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 마찰압접에 의한 오스테나이트계 스테인리스강과 비철 재료, 특히 내식성이 우수하면서도 비중이 작은 타이타늄과의 접합에 적용하여 접합부의 기계적 특성과 접합면의 미세조직 및 상분석을 통하여 최적의 접합 조건을 선정하여 우수한 접합성능을 구현하고자 한다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 재료는 Grade II의 순수한 Ti 와 STS 321로서 직경 16mm의 환봉을 사용하였다. 접합용 Ti와 STS 321의 길이는 각각 80mm, 100mm로 하였다. 실험에 사용된 재료의 화학 조성은 Table 1과 같다. 접합면은 에머리 페이퍼 #200으로 연마 후 아세톤으로 세정한 뒤 Fig. 1과 같

이 시편의 한 쪽을 고정시킨 후 다른 쪽을 회전시킨 후 가압하여 접합을 하였다. 본 실험에서 적용한 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. 접합부의 현미경조직은 Ti의 경우 크롤 용액(kroll reagent, HF 1ml, H₂O 100ml, HNO₃ 3ml) 로 3초간 에칭(etching)하여 광학현미경으로 관찰하였으며, STS 321은 왕수 (HCl 45ml, HNO₃ 15ml, CH₃OH 1ml) 로 약1분간 에칭(etching)하여 관찰하였다. 접합강도 측정을 위한 시편은 KS 봉상시험편 4호 규격에 준하여 제작하였고, 접합계면과 수직으로 1.6710⁻⁵m/sec의 변형속도를 주어 인장 시험하였다. 또한 인장시험 후의 파단특성은 주사전자 현미경 (scanning electron microscopy)으로 관찰하였으며 상 및 조성 분석은 XRD와 EDX를 사용하였다. 본 실험에서는 마찰시간(t₁)과 업셋압력(P₂)의 변화에 따른 접합부의 인장 특성을 관찰하였다. Ti와 STS 321의 최적접합조건, 즉 최소한의 재료손실과 최대인장강도를 얻기 위해 본 실험에서는 업셋압력 P₂ (100~475MPa) 과 마찰시간 t₁ (0.3~0.7sec) 에 변화를주어 접합부의 강도를 평가하였다. 업셋시간 t₂ (6sec) 과 마찰압력 P₁ (100 MPa) 그리고 회전속도 (2000 rpm)는 일정하게 하였다. 경도 측정은 접합계면에 수직으로 절단한 후 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 접합부의 중앙과 외주부에서 1mm 간격으로 하중 300gf을 주어 측정하였다.

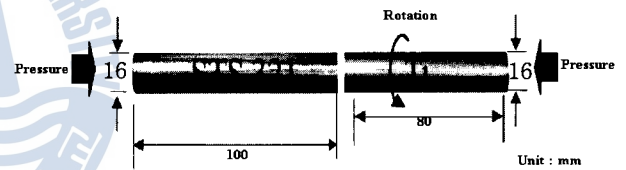


Fig. 1 Schematic diagram of Friction Welding process

Table 1 Chemical composition of used materials(wt%)

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	H	O	N	Ti
STS 321	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	11.3	17.2	bal	-	-	-	-
Ti	0.08	-	-	-	-	-	-	0.25	0.015	0.20	0.03	bal

Table 2 Friction welding conditions

Friction time(t ₁)	0.3, 0.5, 0.7 (sec)
Upset pressure(P ₂)	100 ~ 475 MPa
Upset time(t ₂)	6sec
Friction pressure(P ₁)	100 MPa
Rpm	2000

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 와 3 은 Ti와 STS 321의 마찰압접된 상태에서 접합부의 광학현미경 조직을 나타냈다. 동일한 마찰시간하에서 업셋압력이 각각 100MPa, 250MPa, 475MPa 으로 증가함에 따라 접합계면과 접합체의 변형이 증가하였다. 실험조건 중 가장 낮은 업셋압력인 100MPa의 경우 균일한 접합면을 나타내고 있으며 모재의 변형도 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 버(burr)의 방향과 위치도 Ti 쪽에만 한정되었다. 그러나, 업셋압력이 증가함에 따라 접합면과 접합체의 변형이 증가하였으며, 버(burr)의 형상과 방향에도 변화가 나타났다.

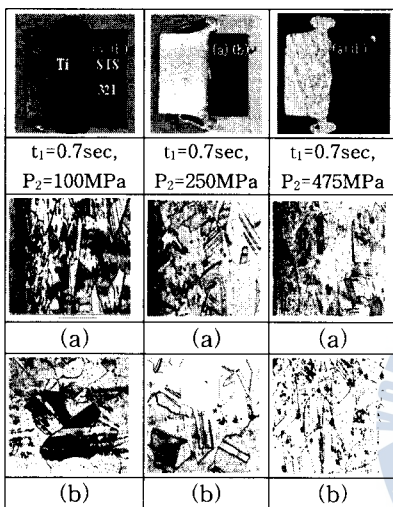


Fig. 2 Microstructure of joint($t_2 = 6\text{sec}$ and $P_1 = 100\text{MPa}$)
 (a) Near interface (b) Base metal

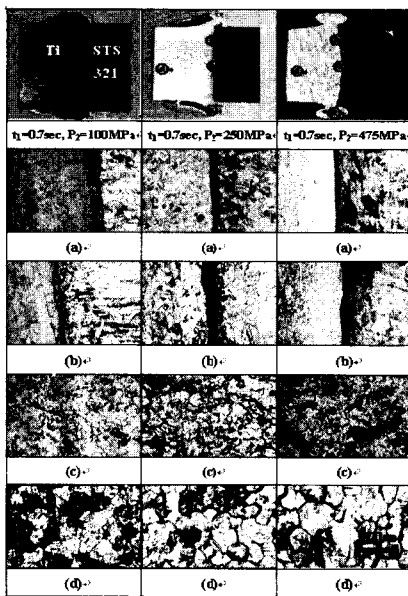


Fig. 3 Microstructure of joint($t_2 = 6\text{sec}$ and $P_1 = 100\text{MPa}$)
 (a) Central interface (b) Peripheral interface
 (c) Burr (d) Base metal

즉, 100MPa의 경우와 달리 업셋압력 증가에 따라 접합계면이 불균일한 형상을 나타내며, 모재의 형상도 압력 증가에 따라 burr의 배출방향과 같은 방향으로 변형되었음을 알 수 있다.

즉, Ti 쪽에서 형성된 버(burr)가 STS 321를 감싸는 형상을 나타내며 또한, 계면 근방의 STS 321 조직은 미세한 결정립들이 압력증가에 따라 100MPa과 비교하여 그 폭이 감소하였음을 알 수 있다. 이는 업셋 압력증가로 계면 근방에 생성된 미세 결정립들이 버(burr)로 배출되어진 것으로 판단된다. 또한, Fig. 3 (a)(b)에서 알 수 있듯이 Ti측에서도 접합계면을 따라서 미세화된 Ti의 조직이 관찰되며, Fig. 3 (c)는 접합계면에서 배출된 조직으로 Ti과 STS 321가 혼합된 조직으로 판단된다. 접합부에서 떨어진 Fig. 3 (d)의 경우는 Ti의 모재 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다.

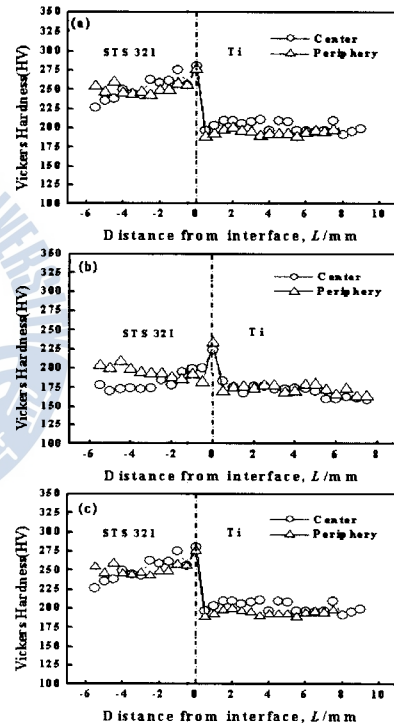


Fig. 4 Hardness distribution across interface region of as-welded
 (friction pressure (P_1) = 100 MPa, upset time (t_2) = 6 sec and friction time (t_1) = 0.7sec)
 (a) $P_2 = 100\text{MPa}$ (b) $P_2 = 250\text{MPa}$ (c) $P_2 = 475\text{MPa}$

Fig. 4는 업셋시간과 마찰시간, 마찰압력을 6sec, 0.7sec, 100MPa으로 각각 일정하게 한 후 업셋압력을 각각 100MPa, 250MPa, 475MPa 로 증가시켰을 때의 접합된 시편의 단면중심부와 외주부에서 위치에 따른 경도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 시편에서도 중심부와 외주부간의 경도차이가 나타났다. 이는 외주부와 중심

부의 회전 속도의 차이에 의해 발생된 마찰열의 크기가 달라지며, 그 결과 중심부와 외주부간의 조직의 차이로 나타나게 된다. 따라서, 마찰열의 크기와 위치에 따른 소성변형능의 차이가 중심부와 외주부에서 각기 다른 양상으로 나타나게 되어 경도값의 변화가 나타나는 것으로 판단된다. 그러나, 업셋 압력이 증가함에 따라 중심부와 외주부간의 경도차이가 감소함을 알 수 있다. 이는 높은 업셋압력에 의해 열화된 영역의 배출이 충분히 이루어져 계면의 위치에 따른 조직의 차이가 감소할 결과로 사료된다. 일반적으로 용융용접에 의한 접합부의 인장특성은 용접응고조직, 결정입도, 화학조성, 정출물의 양과 그 분포형태 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[8]. 그러나, 마찰압접법은 고상상태에서 접합이 이루어지므로 접합특성에 미치는 인자가 용융접합법에 비하여 훨씬 적고 제어가 용이하다는 장점이 있다. 본 실험에서는 업셋 시간을 6sec, 마찰압력 100MPa로 각각 고정시킨 후 마찰시간과 업셋압력에 변화를 주어 인장강도의 변화를 살펴보았다.

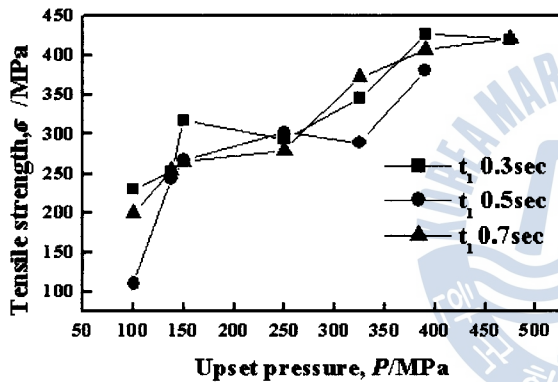


Fig. 5 Change in tensile strength with upset pressure

Fig. 5는 각각의 마찰시간에 대해 업셋압력을 100MPa에서 최대 475MPa까지 증가시켰을 때 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 업셋압력 증가가 인장강도에 직접적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

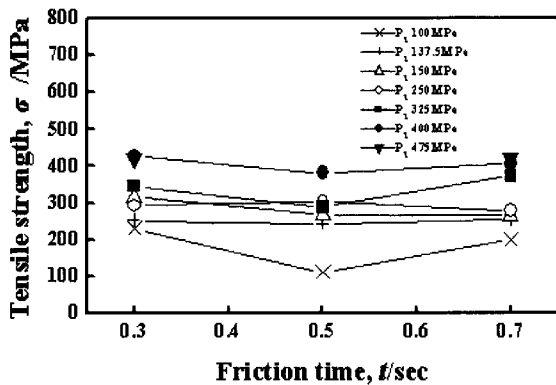


Fig. 6 Variations in tensile strength with friction time

마찰시간 증가에 따른 인장강도의 변화는 Fig. 6에 나타났다. 각각의 업셋압력에서 마찰시간 증가에 따른 인장강도의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 앞서 Fig. 2와 3에서 나타난바와 같이 업셋압력 증가가 접합계면의 불균일을 일으키는데 이는 위치에 따라 다른 마찰열의 발생에 의해 생성된 열화영역의 크기와 밀접한 관련이 있는데 높은 업셋압력이 이러한 열화영역에 가해질 경우 계면의 위치에 따라서 다른 소성변형능에 의해 재료가 불균일하게 변형이 이루어지며, 그 결과 상대적으로 극심한 변형을 겪은 외주부가 중심부에 비해 많은 접합면이 서로 결합됨을 의미한다. 따라서, 각 재료의 결합표면적 증가가 접합강도를 상승시키는 것으로 사료된다. 또한 높은 업셋압력은 접합계면에 형성된 산화물과 같은 이물질의 배출을 촉진하여 새로운 하부표면급속이 노출되어 재료의 결합력을 상승시키는 것으로 판단된다.

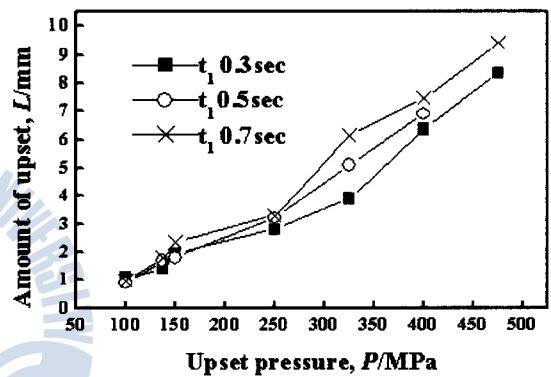


Fig. 7 Change in amount of upset pressure

Fig. 7은 각각의 마찰시간에 대한 업셋압력 증가에 따른 업셋량을 나타낸 것이다. Fig. 5와 비교해보면 업셋압력 증가와 업셋량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 업셋압력이 증가함에 따라 업셋량과 인장강도 모두 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이는 높은 업셋압력에 의해 접합계면 근방에 생성된 열화된 영역이 배출되어졌음을 나타낸다. 이와 같이 열화영역의 배출에 의해 노출되지 않은 새로운 하부 금속 조직간의 결합이 인장강도의 향상을 가져오는 것으로 판단된다. 그러나, 그림에서 알 수 있듯이 금속의 소성변형량을 결정하는 마찰시간의 영향보다 소성변형된 조직의 배출을 촉진하는 업셋압력의 크기에 재료의 인장강도에 미치는 정도가 보다 직접적인 것으로 판단된다.



Fig. 8 Base metal fracture after tensile test

($t_1=0.7\text{sec}$, $t_2=6\text{sec}$, $P_1=100\text{MPa}$, $P_2=475\text{MPa}$)

Fig. 8은 마찰시간 0.7sec, 업셋압력 475MPa에서 Ti와 STS 321을 마찰압접한 시편의 인장 시험 후 파단된 시편의 외관을 나타낸 것으로 상대적으로 연질 재료인 Ti에서 파단되었음을 알 수 있다. 실험 결과 파단된 접합체의 강도는 Ti 모재의 인장강도와 동등한 값을 나타내어 접합체의 접합강도가 우수함을 알 수 있다. 또한, 모재 파단이 아닌 경우에도 접합강도는 모재의 인장강도에 근접한 값을 나타내어 마찰압접에 의한 Ti와 STS 321간의 접합성은 양호한 것으로 나타났다. Fig. 9는 마찰압접한 시편과 압접하지 않은 Ti 모재를 각각 인장시험후의 파면사진이다. 마찰압접한 시편의 파면의 모습과 압접하지 않은 Ti 모재의 파면 모습이 유사한 것을 알 수 있으며, 인장강도 또한 모재의 인장 강도(430MPa)와 동등한 값으로 나타났다.

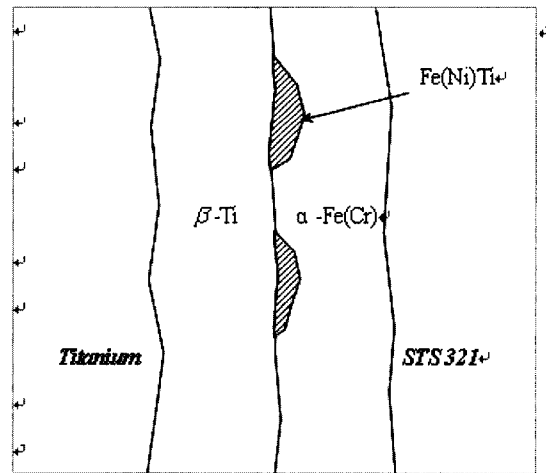


Fig. 11 Proposed structure of bond interface

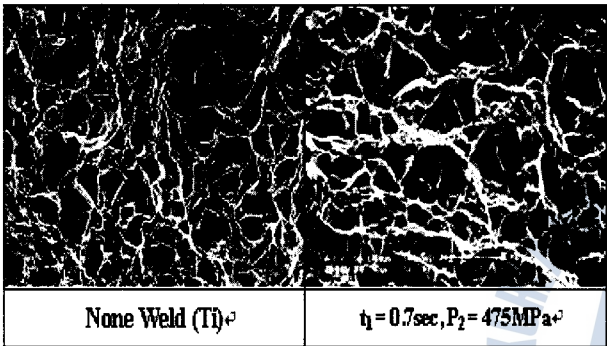


Fig. 9 SEM microfractographs of tensile fracture surface

접합기구에 대해서 검토하기 위해 인장 시험후의 파면에 대해서 XRD분석을 하였다. 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

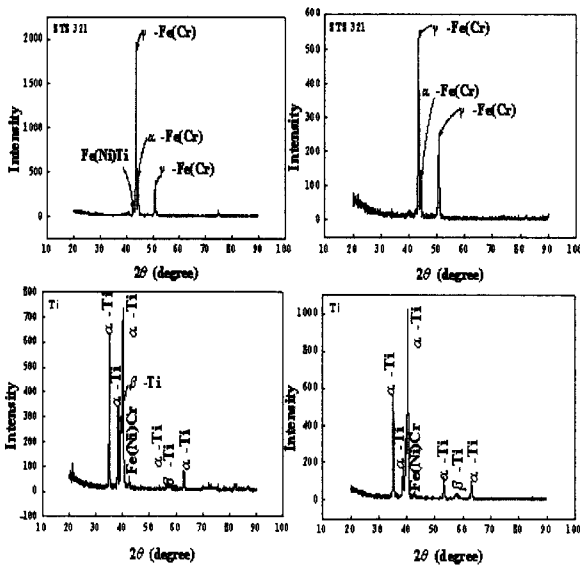


Fig. 10 X-ray diffraction pattern on interface Ti/STS 321 (Friction pressure(P₁)=100MPa, Upset time(t₂)=6sec and friction time(t₁)=0.5sec)

다. STS 321측 파면에서는 모재에서는 보이지 않는 alpha-Fe(Cr) 및 Fe(Ni)·Ti의 회절선이 나타났다. 한편, Ti 측에서는 beta-Ti의 회절선과 약한 Fe(Ni)·Ti의 회절선이 나타났다. 다른 접합부에서는 마찬가지로 alpha-Fe(Cr), Fe(Ni)·Ti 및 beta-Ti의 회절선이 보였다. 그런데, Ti중에 Fe가 확산해서 생기는 beta-Ti상이 나타난다는 연구결과도 있으며[9]. 또한 순 Ti와 STS 321의 확산접합에서도 접합계면의 Ti측은 beta-Ti가 STS 321측은 alpha-Fe(Cr)가 형성되어 그 사이에 Ti₂Ni, Fe(Ni)·Ti, Fe₂Ti, alpha-Fe(Cr), delta-Fe(Cr)의 층이 생성된다는 결과도 있다 [10].

XRD 결과로부터 금속간화합물의 생성 모형을 Fig. 11과 같이 생각할 수 있는데 접합계면의 Ti 측은 beta-Ti가 STS 321측은 alpha-Fe(Cr)으로 되어, 그 사이에 Fe, Ni 및 Ti로부터 만들어진 얇은 금속간화합물층이 형성되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

Titanium-STS 321를 마찰압접법을 적용하여 접합을 실시 마찰시간과 업셋압력 변화에 따른 조직의 변화와 인장강도, 경도 분포와 같은 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. Titanium-STS 321 이종재료의 최적 접합 조건은 마찰시간 (t₁) 0.7sec, 업셋압력 (P₂) 475MPa에서 가장 높은 인장 특성을 나타냈다.
2. 업셋압력이 증가에 비례하여 모재와 접합계면의 변형량이 증가하며, 접합부의 인장강도도 증가하였다.
3. 변형량의 크기를 결정하는 마찰시간보다 접합부의 인장강도에 미치는 영향은 업셋압력에 의한 것이 보다 결정적이다.
4. 접합부의 경도분포는 접합계면의 위치에 따른 차이가 존재하며 이는 발생하는 마찰열의 크기와 밀접하다.

참 고 문 헌

- [1] K.H.Lee, U.Y. Jin, K.H. Shin : J.Kor. Inst. Met.&Mater. Vol. 23, pp. 47-55, 1985
- [2] K.S.Jung, I.C. Kang :J.Kor.Inst.Met.&Mater. Vol. 27 pp. 503-512, 1989
- [3] Ogawa.T, and Koseki. T :Welding Journal Vol. 68, pp 181-191, 1989
- [4] Castro de cadenet : Welding Metallurgy of Stainless and Heat-resisting steels, Cambridge press. pp. 160-161, 1974
- [5] T.Takalo, N. Suutala and T. Moisiso : Metall. Trans. Vol. 10A, pp. 512, 1979
- [6] H. Ochi, K. Ogawa, Y.Yamamoto et al : J. Jpn. Inst. Light Met., Vol. 46 pp. 500-504, 1996
- [7] Y.C. Kim, A.Fuji and T. H. North : Quart. J. Jpn. Weld. Soc. Vol. 12, pp. 243-248, 1994
- [8] T.Takalo, N. Suutala and T. Moisiso : Metall. Trans. Vol. 7A, pp. 1591, 1979
- [9] T. Momono, T. Enjo and K. Ikeuchi :Tetsu-to-Hagane Vol. 73, pp. 1590, 1987
- [10] Shigeharu Hinotani : Tetsu-to-Hagane Vol. 75, pp. 1695, 1989

원고접수일 : 2007년 12월 14일

원고채택일 : 2008년 1월 18일

