

研究論文

Ni / B / Ni 액상확산접합계의 액상폭에 관한 연구

정 재 필* · 강 춘 식**

A Study on the Width of Liquid Layer of Ni / B / Ni Diffusion Bonding System

J. P. Jung* and C. S. Kang**

Key Words : Liquid Phase Diffusion Bonding, Boron, Nickel, Width of Liquid Layer, Isothermal Solidification Time

Abstract

In order to study the bonding mechanism of Ni/B/Ni Transient Liquid Phase bonding system, width of liquid layers were calculated, where in this system melting point of insert material(B) is higher than bonding temperature and melting point of base metal(Ni). Calculated values were compared with experimental ones which were measured by bonding Ni/B/Ni system at 1433-1473K under vacuum atmosphere. As results, the width of initial liquid layer of Ni/B/Ni system was calculated as $W_{il} = W_0 [1 + \{2 \cdot 100 \cdot \rho_B / (X_3 + X_4) \cdot \rho_{Ni}\} \cdot \rho_B / \rho_{Ni}]$, and it was nearly same with experimental values. Maximum width of liquid layer, width of liquid layer during isothermal solidification and isothermal solidification time were calculated also.

1. 서 론

액상 확산접합법(Transient Liquid Phase Bonding, 이하 TLP 접합법으로 약칭함)은 모재보다 용점이 낮은 삽입재 금속을 접합부에 삽입하여 이것을 삽입재의 용융점 이상이면서 모재의 용융점 이하인 온도로 가열하여 삽입재를 용융시킨 다음, 이 온도에서 장시간 유지하여 용융된 삽입재를 등온용

고시켜 접합하는 방법이다^{1, 2)}. TLP 접합법은 내열합금의 접합에 적용하기 위해 개발된 것으로^{1, 2)}, 접합부에 액상이 생성되기 때문에 고상 확산접합법에 비해 접합이 용이하고 브레이징 접합법에 비해 접합강도가 우수하다는 장점을 가지고 있다.

TLP 접합법의 접합기구에 대해서는 많은 연구가 보고되어 있다²⁻⁷⁾. 접합기구중 특히 접합부에서의 액상폭의 변화는 접합과정과 직결되어 중요한 의미를 갖는다. TLP 접합기구중 액상과 관련된 특징으로는 보통 삽입재의 용점이 모재의 용점보다

* 정희원, 한국기계연구원 용접연구부

** 정희원, 서울대학교 금속공학과

낮기 때문에 접합온도에서 삽입재가 순간적으로 용융되고^{4,5,8)}, 접합부 액상의 대부분이 삽입재의 용융에 의한 것이며^{1,2,4,5)}, 접합시 초기 액상폭이 삽입재의 두께와 같다^{4,5)}는 것이다. 삽입재의 용점이 모재 용점보다 높은 접합제로 Ag/Cu/Ag 계가 보고되어 있으나⁹⁾, 이 경우에도 초기 액상폭이 삽입재의 두께와 같다고 보고, 삽입재와 모재의 반응에 의한 액상의 생성에 대한 내용이 언급되지 않는 등 기존의 TLP 접합기구와 크게 다르지 않다.

한편, 저자등은 삽입재의 용점이 접합온도 및 모재의 용점보다 높고, 확산속도가 빠른 B, C 혹은 Si 등을 삽입재로 사용하여 액상 확산 접합하는 방법(액화 유도 확산접합법)⁹⁻¹³⁾을 보고한 바 있다. B를 삽입재로, Ni이나 Ni기 합금을 모재로 사용하여 액상 확산 접합하여 조사한 결과, 이 접합법에서는 액상의 생성과정이나 액상폭이 기 보고된 TLP 접합 결과와는 다른 점이 있음을 확인하였다^{12, 14)}.

즉, 삽입재가 접합온도에서 용융되지 않고, 접합부의 액상이 삽입재와 반응한 모재의 용융에 의해 생성되며, 초기액상폭이 삽입재의 두께와 같지 않다는 것이다.

본 고에서는 이러한 연구 결과를 토대로, 접합시 생성되는 액상폭에 대해 좀 더 깊이 있게 검토하기 위해 Ni/B/Ni계의 액상 확산접합시 액상폭 및 액상 소멸시각 등에 대해 이론적으로 계산하고 그 결과를 실험치와 비교하였다.

2. 액상폭 측정방법

Ni/B/Ni계의 액상 확산접합부 액상폭의 실험값은 다음과 같은 재료와 방법을 사용하여 측정하였다.

2.1 접합시편

실험에 사용된 모재는 Table 1과 같이 순도 99.16%의 Ni이고, 삽입재는 99.6% 순도, -300 mesh 크기의 B 분말을 사용하였다.

접합면은 0.05 μm Al_2O_3 현탁액으로 연마하였으며, 접합시편의 형상은 10×10×20 mm 크기의 Ni 모재 사이에 B 분말을 삽입재로 도포한 것이다. B 분말은 두께 25 μm 에 해당되는 B 분말을 무게로 환산하여 접합면에 도포하였다. 도포 방법은 접합면에 메칠 알콜과 B 분말을 혼합하여 가능한한

균일하게 도포하였으며, 알콜이 기화된 후에는 B 분말이 잔류되어 이것이 삽입재로 사용된다. B이 도포된 접합시편은 고정용 목적으로 양쪽을 STS 304 판재로 점용접하였다. 접합시편에 점용접된 STS 304 판재는 고정대로 작용하여 접합부에 액상이 생성되었을 때 시편 자중에 의해 액상이 접합부 외부로 밀려나는 것을 방지하고, 시편의 취급을 용이하게 하기 위한 것이다.

접합중 접합시간에 따라 접합부에 생성되는 액상의 폭과 B의 거동을 정확히 관찰하기 위해 접합시편은 급열, 급냉시킬 필요가 있다. 이러한 작업을 용이하게 하기 위해, 접합시편을 내경 13 mm, 외경 15 mm의 석영관 속에 진공 밀봉하였으며, 석영관 내의 진공도는 6.5×10^{-1} Pa로 하였다.

2.2 접합 조건

진공 밀봉된 접합시편은 접합온도로 유지되어 있는 유도로 속에 바로 장입하였다. 장입된 시편이 상온에서 접합온도까지 도달하는 시간은, 접합온도 1433K의 경우 69초(이하 s로 표기함), 1453K의 경우 71s, 1473K의 경우 73s가 소요되었다.

시편의 접합온도는 주로 1433-1473K의 온도 범위에서 택하였다. 그 이유는 Ni-B 상태도¹⁵⁾에 의하면 1429K 이상의 온도에서는 Ni과 B의 급속한 화합물이 생성되지 않기 때문에 접합부에서 액상이 생성될 때 생성 과정이 단순화될 것으로 판단되었기 때문이다.

접합온도에서 규정된 시간 동안 유지된 접합시편은 상온의 수조 속에 급냉시켰다.

2.3 액상폭 측정

접합온도에서 접합부에 생성된 액상폭을 측정하기 위하여, 유도로속의 접합 시편은 상온의 냉각수로 급냉하였으며, 급냉된 접합시편 단면을 잘라 광학 현미경 조직사진을 촬영한 후, 접합부 면적(공정 조직의 면적)을 접합부의 길이(정사각형 접합면의 한 변 길이)로 나눈 값을 공정폭으로 하였다⁵⁾. 유도로속의 접합 시편을 상온의 냉각수로 급냉하는 시간(약 1s)을 무시하여 이 시간중의 액상폭 변화를 무시하고, 공정조직 속에 관찰되는 수지상(dendrite)이 급냉에 의해 생성되었다고 하면(즉, 급냉전의 액상영역이 완전 용융 상태라고 하

면), 공정폭은 급냉 직전 접합온도에서의 액상폭으로 간주될 수 있을 것이다⁹. 이와같은 가정하에 측정된 공정폭을 급냉 직전 접합온도에서의 액상폭으로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 액상폭

Ni/B/Ni 접합계의 경우에는 접합온도에 도달하는 순간에도 삽입재가 고상으로 존재하다가, 접합온도에서 유지시간이 증가함에 따라 삽입재가 모재중으로 확산되면서 삽입재가 모재와 반응하고, 반응한 모재중 용점이 접합온도보다 낮아진 부분이 용융되어 액상이 생성된다^{12,14}. 유지시간이 더욱 증가되면, 액상량이 증가되면서 고상의 삽입재가 사라지는 순간이 생기는데 이때의 액상폭이 초기 액상폭이 된다.

Ni/B/Ni 접합계에 대해 초기 액상폭을 이론적으로 계산해보면 다음과 같다. 접합부를 가열하기 전 접합부에 도포된 순도 100%의 삽입재 두께를 W_0 라고 하자. 모재 Ni과 삽입재 B의 반응에 의해 액상이 생성되는 도중, 액상중의 B 농도는 Fig.1을 참조하면 삽입재측 계면에서는 X_4 , 모재측 계면에서는 X_3 가 된다. 고상의 삽입재가 사라지는 순간,

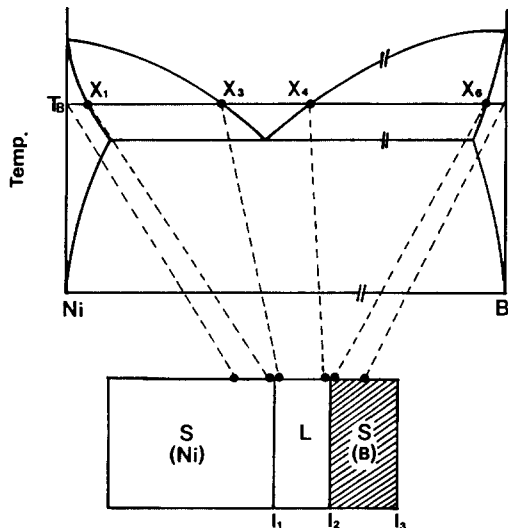


Fig. 1 B content on the Ni/B boundary when liquid metal was producing.

즉 초기 액상폭에서의 액상중의 B의 평균농도를 $(X_3 + X_4)/2$ 라고 가정하면, 초기액상폭(W_{IL})과 삽입재 두께(W_0) 및 이들 중의 B농도는 Fig.2.a와 같이 나타낼 수 있다. Fig.2.a에서, 접합 전후 B의 mass balance를 고려하면 (식1)을 얻을 수 있다.

$$W_0 \cdot \rho_B \cdot 100 = W_{IL} \cdot \rho_{IL} \cdot (X_3 + X_4)/2 \quad (식1)$$

$$\text{여기서, } \rho_{IL} = f_B \cdot \rho_B + f_{Ni} \cdot \rho_{Ni} \quad (식2)$$

$$f_B = V_B / (V_B + V_{Ni}) = [(X_3 + X_4)/2 / \rho_B] / [(X_3 + X_4)/2 / \rho_B + \{100 - (X_3 + X_4)/2\} / \rho_{Ni}] \quad \dots\dots\dots (식3)$$

$$f_{Ni} = V_{Ni} / (V_B + V_{Ni}) = [\{100 - (X_3 + X_4)/2\} / \rho_{Ni}] / [(X_3 + X_4)/2 / \rho_B + \{100 - (X_3 + X_4)/2\} / \rho_{Ni}] \quad \dots\dots\dots (식4)$$

- 단, W_0 : 삽입재의 두께(μm)
- W_{IL} : 초기 액상폭(μm)
- ρ_{IL} : 초기 액상폭에서 액상의 밀도(g/cm^3)
- ρ_B : B의 밀도(g/cm^3)
- ρ_{Ni} : Ni의 밀도(g/cm^3)
- f_B : 초기액상폭 중 B의 부피분율
- f_{Ni} : 초기액상폭 중 Ni의 부피분율
- V_B : 초기액상폭 중 B의 부피
- V_{Ni} : 초기액상폭 중 Ni의 부피
- X_3 : 모재측 액상선 농도(wt%)
- X_4 : 삽입재측 액상선 농도(wt%)

(식2), (식3), (식4)를 (식1)에 대입하면 (식5)를 얻을 수 있다.

$$W_0 \cdot \rho_B \cdot 100 = (W_{IL} - W_0) \cdot \rho_{Ni} \cdot (X_3 + X_4)/2 + W_0 \cdot \rho_B \cdot (X_3 + X_4)/2 \quad \dots\dots\dots (식5)$$

(식 5)로 부터 초기 액상폭 W_{IL} 은 (식 6)과 같이 구할 수 있다.

$$W_{IL} = W_0 [1 + \{2 \cdot 100 \cdot \rho_B / (X_3 + X_4) \cdot \rho_{Ni}\} - \rho_B / \rho_{Ni}] \quad \dots\dots\dots (식6)$$

단, W_{IL} 의 계산 과정에서 B와 반응한 Ni이 고상에서 액상으로 변할 때의 부피 변화는 무시하였다. 또, 액상부 외측의 고상의 모재중으로 확산해 나간 B의 량도 무시하였는데, 그 이유는 Ni-B 상태

도¹⁵⁾에 의하면 고상중의 B 농도가 액상중의 B 농도에 비해 극히 적기 때문이다. 예를 들어, 1453K에서 액상이 생성되기 위한 최저 B의 농도(액상선 농도)는 3.15 wt%(13 at%)이나, 고상에서의 B 농도(고상선 농도)는 0.03 wt%(0.22 at%) 이하로 극히 적다.

삼입재의 용점이 접합온도보다 낮은 TLP 접합법에서는 접합온도에 도달하는 순간 삼입재가 바로 용융되기 때문에, 고상에서 액상으로의 상변화에 의한 부피 변화를 무시하면 $W_{II} = W_0$ 즉, 초기 액상폭은 삼입재가 두께와 동일하다³⁻⁵⁾. 반면, (식 6)의 초기 액상폭 계산 결과로 부터 Ni/B/Ni 접합계의 W_{II} 은, $W_{II} \approx 3.5W_0$ 로 W_{II} 이 W_0 보다 크다는 것을 이론적으로 확인할 수 있다. W_{II} 이 W_0 보다 큰 이유는 초기 액상폭 중의 B 함량($X_3 + X_4$)/2가 100%보다 작기 때문인데, 예로써 1453K에서의 초기 액상폭 중의 B 함량($X_3 + X_4$)/2는 9.43wt%이다.

Ni/B/Ni계에서 초기 액상폭을 실험적으로 측정 한 결과, 삼입재 두께 25 μm , 접합온도 1433K, 1453K, 1473K에서 유지시간 각각 90s, 50s, 45s일때 초기 액상폭은 각각 87 μm , 81 μm , 80 μm 가 얻어졌다. 이로부터 초기 액상폭은 삼입재의 두께보다 크다는 것을 실험적으로도 확인할 수 있다.

(식 6)에서, W_{II} 은 삼입재 두께 W_0 및 X_3, X_4 값에 따라 즉, 접합온도에 따라 변화함(X_3, X_4 값이 접합온도에 따라 변화됨)을 알 수 있다. 만일, 접합온도가 일정하게 되면 X_3, X_4 값도 일정해지므로, 일정온도에서 초기 액상폭은 삼입재 두께에 직선적으로 비례하게 된다.

Table 1에 삼입재 B의 두께가 25 μm 이고, 접합온도가 1433K, 1453K, 1473K일때, (식 2)에 의해 구한 초기 액상폭과 실험적으로 구한 초기 액상폭을 비교하였다. 단, 계산에 사용된 상수는 $\rho_B = 2.34 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{Ni} = 8.9 \text{ g/cm}^3$ 이고, 1433K, 1453K, 1473K에서 X_3 값은 각각 3.26wt.%, 3.15wt.%, 3.05wt.%이며, X_4 값은 각각 15.37wt.%, 15.61wt.%, 15.85wt.%이다. 단, X_3, X_4 값은 Ni-B 상태도¹⁵⁾에서 각각 공정온도 1366K, 1308K에서 액상선의 B 농도가 3.6wt.%, 13.87wt.%이고, 액상선을 직선으로 가정하였을 때의 계산 결과이다.

계산값과 실험값의 비교로부터, 이론적으로 계산한 값과 실험적으로 구한 값은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of calculated w_{II} (initial width of liquid) and experimentally measured W_{II}

Bonding Temp.(K)	Calculated W_{II} (μm)	Measured W_{II} (μm)
1433	89	87
1453	88	81
1473	88	80

3.2 최대 액상폭

Ni/B/Ni계의 초기 액상폭중의 B농도는 전술한 바와 같이 X_3 와 X_4 사이에 존재한다. 접합온도 T_B 에

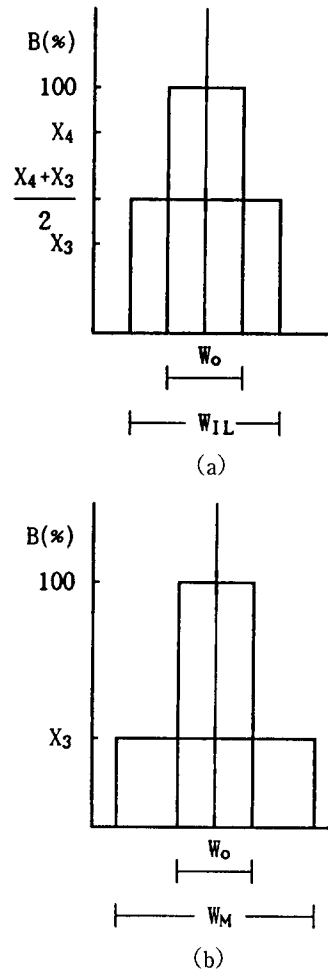


Fig. 2 Comparison of B content for calculating (a) initial width of liquid layer, W_{II} , and (b) maximum width of liquid layer, W_M .

서 접합부가 액상으로 존재할 수 있는 최저 B 농도 즉, 액상선의 B 농도는 X_B 이기 때문에 액상중의 B 농도가 X_B 로 낮아질 때까지는, B의 확산에 의해 X_B 농도에 달한 모재가 용융되므로서 액상폭은 증가될 것이다. 액상중의 B 농도가 X_B 가 되면 이 순간부터는 액상 중의 B 농도가 확산에 의해 감소됨에 따라 등온응고가 시작되기 때문에 액상폭은 더 이상 증가되지 않으며, 최대 액상폭이 된다.

최대 액상폭(W_M)을 이론적으로 계산해 보면 다음과 같다.

삼입재 두께(W_0)와 최대 액상폭, 이들 중에서의 B 농도를 Fig.2.b에 나타내었다. Fig.2.b에서 삼입재 두께 및 최대 액상폭에서의 B 농도의 mass balance를 고려하면 (식 7)을 얻을 수 있다. 단, W_M 계산시에도 W_{ll} 계산 때와 마찬가지로 고상중의 B 농도와 모재 금속의 용융에 의한 부피 변화는 무시하였다.

$$W_0 \cdot \rho_B \cdot 100 = W_M \cdot \rho_M \cdot X_B \quad \dots\dots\dots (식7)$$

$$\text{여기서, } \rho_M = f_B \cdot \rho_B + f_{Ni} \cdot \rho_{Ni} \quad \dots\dots\dots (식8)$$

$$f_B = V_B / (V_B + V_{Ni}) = (X_B / \rho_B) / \{ X_B / \rho_B + (100 - X_B) / \rho_{Ni} \} \quad \dots\dots\dots (식9)$$

$$f_{Ni} = V_{Ni} / (V_B + V_{Ni}) = \{ (100 - X_B) / \rho_{Ni} \} / \{ X_B / \rho_B + (100 - X_B) / \rho_{Ni} \} \quad \dots\dots\dots (식10)$$

단, ρ_M : 최대 액상폭에서의 액상의 밀도(g/cm^3) (식8), (식9), (식10)을 (식7)에 대입하면 (식11)을 얻을 수 있다.

$$W_0 \cdot \rho_B \cdot 100 = [(W_M - W_0) \cdot \rho_{Ni} + W_0 \cdot \rho_B] \cdot X_B \quad \dots\dots\dots (식11)$$

(식11)로 부터, 최대 액상폭 W_M 을 (식12)와 같이 구할 수 있다.

$$W_M = W_0 \cdot \{ 1 + (\rho_B / \rho_{Ni}) \cdot (100 - X_B) / X_B \} \quad \dots\dots\dots (식12)$$

(식12)에서, 최대 액상폭 W_M 은 삼입재 두께 W_0 에 비례하고, X_B 값에 따라 즉, 접합온도에 따라 변화된다. 만일 접합온도가 일정하면 X_B 값도 일정해 지므로, 일정온도에서 최대액상폭은 삼입재의 두

께에 직선적으로 비례하게 된다.

Table 2는 삼입재 두께 25 μm 이고, 접합온도 1433K, 1453K, 1473K일때, (식12)에 의해 구한 최대 액상폭과 실험적으로 구한 최대 액상폭을 비교한 것이다. 단, (식12)에 의해 W_M 을 계산할 때 사용한 X_B , ρ_{Ni} , ρ_B 값들은 W_{ll} 을 계산할 때 사용한 상수와 동일한 것이다. 1433K, 1453K, 1473K에서 유지 시간 각각 830s, 575s, 300s일때, 실험적으로 얻은 최대 액상폭은 각각 138 μm , 146 μm , 158 μm 이었고 계산값은 각각 220 μm , 227 μm , 234 μm 이었다. 이들 값의 비교로부터 실험값이 계산값보다 적음을 알 수 있다. 그 이유에 대하여는 정량적으로 명확히 해명하지 못하였으나, 정성적으로 볼 때, 액상 금속이 접합부에 생성되면 액상중의 일부가 wetting 현상에 의해 모재 표면을 따라 접합부 밖으로 유출될 것이므로, 접합부에 잔류되는 액상량이 감소될 것이기 때문에 실제 액상폭은 계산값보다 적어진 것으로 사료된다.

Table 2. Comparison of calculated W_M (maximum width of liquid) and experimentally measured W_M

Bonding Temp.(K)	Calculated W_{ll} (μm)	Measured W_{ll} (μm)
1433	220	138
1453	227	146
1473	234	158

(식12)에 의해 계산된 Table 2의 W_M 값을 검토해보면 $W_M \approx 9W_0$ 가 된다. 이 값은 TLP 접합시 Ag/Cu/Ag 계에서 Tuahpoku 등⁹⁾이 계산한 $W_M \approx 4.9W_0$ 보다 약 1.8배가 크다. 이러한 차이는 Ni/B/Ni계와 Ag/Cu/Ag 계의 구성 원소들이 서로 다르고, 삼입재와 모재가 반응하여 액상이 생성되는 액상선의 농도가 두 계에서 서로 다르기 때문으로 판단된다.

3.3 등온응고시의 액상폭

액상 확산접합의 경우, B이 모재중으로 확산되어 나가서 액상선 농도 이하가 되어야 등온응고가 진행되고, 등온응고시 액상폭과 유지시간의 제곱근(\sqrt{t})이 직선적인 관계를 갖는 것으로 보고되어 있기 때문에, 등온응고 과정은 용점 이하 원소 B의 확산을속 과정으로 이해되고 있다^{3-6, 8, 10)}.

Fig.3는 Ni/B/Ni계를 액상 확산접합할 때 \sqrt{t} (단, $t' = t - t_{ii}$, 식13 참조)에 따라 액상폭이 감소되는 등

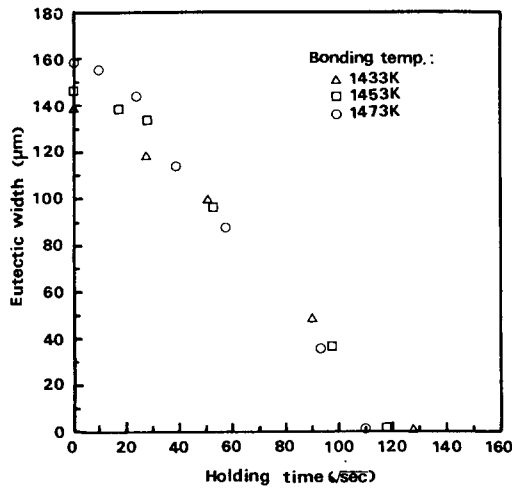


Fig. 3 Relation between eutectic width of Ni/B/Ni joint and square root of holding time(\sqrt{t} , $t'=t-t_m$) during isothermal solidification.

은용고 과정을 나타낸 것이다. 이 결과에서 액상 폭과 \sqrt{t} 는 거의 직선적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 B의 확산에 의한 등온용고 현상과, 액상폭과 \sqrt{t} 의 직선 관계로부터, Ni/B/Ni계의 등온용고 과정도 용접 저하 원소 B의 확산을 속 과정인 것으로 판단된다.

이 결과로부터 Ni/B/Ni계에서 등온용고시 임의의 시간 t에서의 액상폭 W_i 는 (식13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_i = W_m - k \sqrt{t'} \quad \text{..... (식13)}$$

단, W_m : 최대액상폭

k : 상수

D_b : 접합온도에서 고상모재 Ni중 B의 확산계수

$t' = t - t_m$

t : 등온용고중 임의의 시간

t_m : 최대 액상폭 도달시간

Fig.3의 실험결과와 Nakao등¹⁶⁾이 구한 Ni 중 B의 확산계수 D_b 값을 사용하여 (식13)의 k값을 실험적으로 구해보면 Table 3와 같다. 단, Table 3의 값들중 W_m , t_m , t , t_m 등은 k 값을 구하기 위해 대입된 Fig.3의 실험결과 값이며, t 및 W_i 로는 거의 등온용고 완료된 시점의 시각과 액상폭을 사용하였다.

Table 3에서 구한 k값을 사용하면, Ni/B/Ni 접합계에서 B 두께가 25 μ m이고 접합온도가 1433K, 1453K, 1473K인 경우, 등온용고중 임의의 시간에서의 대략적인 액상폭을 (식14)와 같이 실험적으로 구할 수 있다.

$$W_i \approx W_m - 0.38 \sqrt{Dt'} \quad \text{..... (식14)}$$

단, $t' = t - t_m$

3.4 액상소멸 시각

Ni/B/Ni계 접합부 액상 중의 B 농도가 X_0 이하로 되면 등온용고(액상소멸)가 시작되고, B 농도가 X_1 에 도달하면(Fig.1 참조) 액상은 완전히 소멸되어 등온용고가 완료된다.

본 절에서는 Ni/B/Ni계에서 최대 액상폭(W_m) 도달 이후부터 등온용고시에 Ni 중으로의 B의 확산과정에 대해 error function을 적용하므로써 액상소멸 시각(등온용고 완료시각) t_f 를 구해 보고자 한다.

만일, Ni/B/Ni 접합계에서 삽입재 B이 반무한 영역(semi-infinite region)인 Ni 모재내를 확산해 간다고 하면, 임의의 위치 x 및 시간t에 따른 B의 농도 $X(x,t)$ 는 (식15)와 같이 주어진다¹⁷⁾.

$$X(x, t) = \frac{1}{2} X_0 [\text{erf}\{(W_m/2 - x)/2\sqrt{Dt}\} + \text{erf}\{(W_m/2 + x)/2\sqrt{Dt}\}] + X_1 \quad \text{..... (식15)}$$

액상폭의 중앙 부분이 등온용고되면 액상이 소

Table 3. Calculation of k-value of eq. 13

Bonding Temp.(K)	t_m (s)	W_m (μ m)	t(s)	W_i (μ m)	D_b (m^2/s)	k
1433	830	138	17100	1	0.82×10^{-9}	0.375
1453	575	146	14400	2	1.03×10^{-9}	0.381
1473	300	158	12300	1	1.3×10^{-9}	0.397

Table 4. Constants for calculating t_i and result of calculated and measured value

Bond. temp. (K)	X(0, t_i) (wt. %)	X _i (wt.%)	X _s (wt.%)	W _M /2 (μm)	D (m ² /s)	t _M (sec)	Calculated t _i (sec)	t _i (sec)	
								cal.	meas.
1433	0.036	3.26	0	69	0.82×10 ⁻⁹	830	15529	16359	17930
1453	0.033	3.15	0	73	1.03×10 ⁻⁹	575	15000	15575	14975
1473	0.031	3.05	0	79	1.30×10 ⁻⁹	300	14310	14610	12600

떨린다고 볼 수 있으므로, 계산의 대상이 되는 B 농도는 액상폭의 중앙, 즉 $x=0$ 인 곳이다. $x=0$ 에서의 B 농도 $X(0, t)$ 는 (식15)로부터 (식16)과 같이 계산된다.

$$X(0, t) = X_s \cdot \operatorname{erf}\left\{\frac{(W_M/2)}{2\sqrt{Dt}}\right\} + X_0 \quad \dots \text{(식16)}$$

단, x : 액상폭 중앙에서 모재 Ni쪽으로는 거리

$$X_0 = X_i - X_s \text{ (wt.%)}$$

X_s : 모재의 B 농도 (wt.%)

X_i : 액상중의 B 농도 (wt.%)

(식16)에서 $X_0=0$ 이라 하고, $X_i=X_s$, 등온응고 완료시 즉, 액상 소멸시의 $X(0, t_i)=X_i$ 이 된다(단, t_i : 액상소멸 시각). Table 4에 주어진 $X(0, t)$, X_s , $W_M/2$, D , 값들을 (식16)에 대입시키면, (식16)에서 t_i 의 값 즉, 최대 액상폭 도달 이후부터 등온응고 완료시까지 소요되는 시간을 계산할 수 있다.

계산된 t_i 값으로부터, 접합 시작부터 액상소멸 시각까지 소요된 시간은 (식17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_i = t_s + t_M \quad \dots \dots \dots \text{(식17)}$$

단, t_M : 최대 액상폭 도달 시간

t_s : (식16)의 해

(식17)을 사용해서 구한 t_i 값과 실험적으로 얻어진 t_i 값을 Table 4에 나타내었다. 1433K, 1453K, 1473K의 접합온도에서 액상소멸 시각 t_i 의 실험치는 각각 17930s, 14975s, 12600s 이었고, 계산치는 각각 16359s, 15575s, 14610s로 나타났다. 이로부터 실험치와 계산치가 대체로 비슷한 수준을 보이고 있음을 알 수 있다.

삼입재의 용점이 접합온도보다 낮은 Ni/Ni-B/Ni 계에 대해서도 유사한 방법으로 등온응고 완료시각을 계산한 것이 있는데, 이 경우에도 실험값과

계산값이 잘 일치한다고 보고되어 있다¹⁰⁾. t_i 의 계산결과와 B 농도 감소에 의한 등온응고 특성 등으로 볼 때, 본 Ni/B/Ni계의 접합과정중 등온응고 과정은 Ni/Ni-B/Ni계와 거의 동일한 것으로 판단된다.

4. 결 론

접합온도 및 모재의 용점보다 높은 용점을 갖는 삼입재를 사용하는 Ni/B/Ni계를 액상 확산접합 할 때, 접합과정에서의 액상폭을 이론적으로 계산하고 그 결과를 실험적으로 측정된 값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 계산된 초기 액상폭 W_{i0} 은 $W_{i0} = W_0 \left[1 + \left\{ 2 \cdot 100 \cdot \rho_B / (X_i + X_s) \cdot \rho_{Ni} \right\} - \rho_B / \rho_{Ni} \right]$ 이었으며, 계산값은 실험값과 대체로 일치하였다.
- 2) 계산된 최대 액상폭 W_M 은 $W_M = W_0 \cdot \left[1 + (\rho_B / \rho_{Ni}) \cdot (100 - X_i) / X_s \right]$ 이었다.
- 3) 등온응고시 임의의 시각에서의 액상폭 W_i 는 $W_i = W_M - k \sqrt{Dt}$ 로 계산되었다.
- 4) 계산된 액상소멸 시각 t_i 는 $t_i = t_s + t_M$ (단, t_s 는 $X(0, t) = X_i \cdot \operatorname{erf}\left\{\frac{(W_M/2)}{2\sqrt{Dt}}\right\} + X_0$ 의 해) 이었으며, 계산값과 실험값은 대체로 일치하였다.

참 고 문 헌

1. Hoppin G.S.II et al: Weld. J., 49(1970), No.11, p.505-s
2. Duvall D.S. et al: Weld. J., 53(1974), No.4, p. 202
3. Lesoult G.: Modeling of the Transient Liquid Phase Bonding Process 1, CJM Report, Carnegie-Mellon Univ., (1976)
4. 姜晶允: 大阪大學 博士學位 論文, (1988)
5. Tuahpoku I. et al: Metal Trans. A, 19A(1988),

- No.3, p. 675
6. Liu S. et al : Weld. J., 70(1991), No.8, p.207-s
 7. 井川 외 : 溶接學會誌, 47(1978), No.7, p. 440
 8. 恩澤 외 ; 溶接學會誌, 47(1978), No.3, p. 161
 9. 정재필 외 : 대한금속학회지, 29권(1991), 5호, p. 529
 10. 정재필 외 : 대한금속학회지, 31권(1993), 3호, p. 323
 11. 정재필 외 : 대한용접학회지, 9권(1991), 3호, p. 26
 12. 정재필 외 : 대한용접학회지, 13권(1995), 2호, p. 132
 13. Jung J.P. et al : U.S. Patent No.5221039
 14. 정재필 외 : 대한금속학회지, (인쇄예정)
 15. ASM : Binary Alloy Phase Diagram, ed. by Massalski T.B., (1986)
 16. 中尾 외 : 溶接學會論文集, 7(1989), No.2, p. 213
 17. Crank J. : The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, 2nd ed., (1975), p. 31
 18. 中尾 외 ; 溶接學會論文集, 9(1991), No.1, p.55