

브레이징 접합부의 설계(II)

- 접합부의 간격 설계 -

강 정 윤

Design of Brazing Joints(II)

Design of Joint Clearance

Chung-Yun Kang

1. 접합 간격과 접합현상

브레이징 공정에서는 용접과 달리 삽입금속을 양 모재 사이에 끼워서 접합하는 경우와 양 모재 사이에 일정한 접합 간격을 두고 액상 삽입금속이 모세관 현상으로 충전시켜 접합하는 경우가 있다. 전자는 후자와 달리 삽입금속의 두께가 바로 접합부 간격이 된다.

접합부 간격을 설계할 때, 반드시 알아야 할 사항은 접합부 간격이 접합현상 및 접합부의 기계적 성질에 미치는 영향이다. 접합 현상으로는 모세관 현상에 의해 액상삽입금속이 접합부를 완전히 충전할 수 있는 지 여부가 가장 중요하다. 둘째로 접합부 간격에 따라서 모재와 접합부의 강도 차이에 의해 생기는 소성변형 거동이 달라지고, 이 효과에 의해 접합부의 강도에 지대한 영향을 미친다.

액상 삽입금속은 접합부의 좁은 틈 사이로 모세관 현상에 의해서 흘러 들어간다. 틈 사이로 흘러 들어간 액상 삽입금속의 선단에는 젖음에 의해서 요철(Meniscus)이 형성되고, 모세관 현상의 구동력인 모세관 압력 P_k 가 발생한다. 모세관 압력 P_k 는 Laplace 식인 (1)식으로 표시된다. 여기서 r_1 및 r_2 는 요철이 직교하는 두 방향의 곡률반경이다.

$$P_k = \gamma_L (1/r_1 + 1/r_2) \quad (1)$$

평형인 2개의 판 사이에서는 $r_2 = \infty$ 이고, 간격을 D 라고 하면 P_k 는 (2)식으로 된다.

$$P_k = 2\gamma_L \cos\theta / D\rho g \quad (2)$$

(2)식으로부터 모세관압력 P_k 는 액상의 표면장력과 접합부 간격 D 에 따라서 변화함을 알 수 있다. 즉 동일 삽입금속인 경우 간격이 좁을수록 모세관 압력이 크므로, 접합부 내에 액상삽입금속이 충전이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

또한 평형인 2개의 판 사이의 액체의 최대 수직 상승 높이 H 는 (3)식으로 표시된다. 여기서 ρ 는 액체의 밀도, g 는 중력가속도이다.

$$H = 2\gamma_L \cos\theta / D\rho g \quad (3)$$

(3)식으로부터 액상삽입금속의 충전 길이와 접합부 간격과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 이음부 형상이 겹치기 이음인 경우에는 접합 폭과 간격을 동시에 고려하여 설계하여야 할 것이다.

접합부 간격을 잘못 설정하게 되면, 모세관 압력이 약하게 되어, 액상삽입금속이 접합부 내에 완전히 충전할 수 없으므로 보이드를 형성하거나, 사용한 플라스트를 배출시키지 못하여 잔류하게 된다. 이것은 접합 강도를 저하시키는 요인이 된다. 이상적인 간격은 가장 좁은 것이 좋지만, 모재의 표면 상태(조도, 산화피막), 접합 분위기, 모재와 액상삽입금속간의 반응성 등에 따라서 적정 간격은 변화하므로 실험을 통하여 정하는 것이 바람직하다.

2. 접합 간격과 접합강도

전술한 바와 같이, 접합 간격은 모재와 접합부의 강도 차이에 의한 소성변형 억제 효과가 다르므로, 접합부의 강도에 영향을 미친다. 접합결합이 없는 가장 이

상적인 경우, 모재의 강도가 삽입금속의 강도보다 높은 경우, 삽입금속 두께가 0에 근접하면 삽입금속 자체의 강도보다 접합부 강도가 높게 된다. 이러한 현상은 강도가 약한 접합부에서 우선 소성변형이 일어나지만, 항복응력이 더 큰 모재의 영향으로 접합부 근방에서 소성변형을 일으키기 위해서는 더욱 큰 응력이 필요하기 때문이다. 그래서, 접합강도가 삽입금속의 본래의 강도보다 큰 경우가 많고, 간격이 좁을수록 접합강도는 크게 된다. 그러나, 너무 좁으면, 삽입금속의 조성에 따라서 다르겠지만, 흐름성이 나쁘게 되고 접합결합이 발생하게 되어 도리어 강도를 저하하게 된다.

그림 1은 수소분위기에서 BAg 삽입금속으로 스테인리스강을 브레이징한 경우 접합간격과 강도와의 관계를 나타낸 것이다. 이것으로부터 접합간격이 좁을 경우, BAg 삽입금속보다 높은 강도를 나타내지만, 넓을수록 강도가 저하하는 것을 알 수 있다. BAg 삽입금속의 강도보다 낮은 이유는 접합간격이 너무 넓기 때문에 접합결합이 발생하기 때문이다.

특히, 맞대기 이음부에서는 삽입금속을 중간에 삽입한 상태에서 브레이징하는 경우가 많고, 이 경우 접합부 간격은 삽입금속의 두께가 된다. 그림 2는 스테인리스강을 수소분위기 중에서 BNi-Cr 삽입금속과 BAg-Mn 삽입금속으로 브레이징한 접합부의 강도와 삽입금속 두께와의 관계를 나타낸 것이다. BAg-Mn 삽입금속은 BNi-Cr 삽입금속과 비교하여, 삽입금속 자체의 강도가 낮기 때문에 접합부 강도도 낮지만, 양쪽 모두 삽입금속 두께가 얇을수록 인장강도는 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나, 기계적 성질 시험 방법 즉 인장시험, 충격시험 등에 따라서 강도에 미치는 영향은 달라질 수 있다. 따라서 실제 브레이징 제품이 사용될 환경에 필요한 특성을 평가하여 접합부 간격을 정하는 것이 가장 바람직하다.

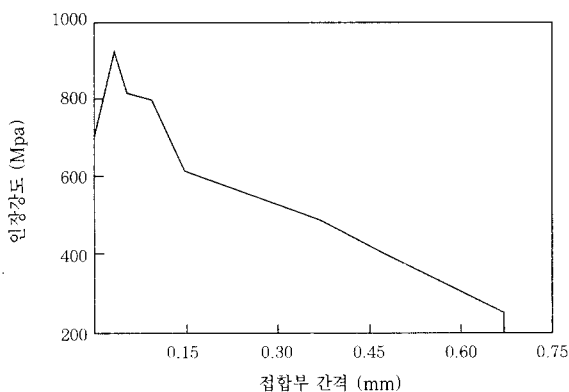


Fig. 1 접합부 간격과 접합강도와의 상관관계(스테인리스강/BAg)

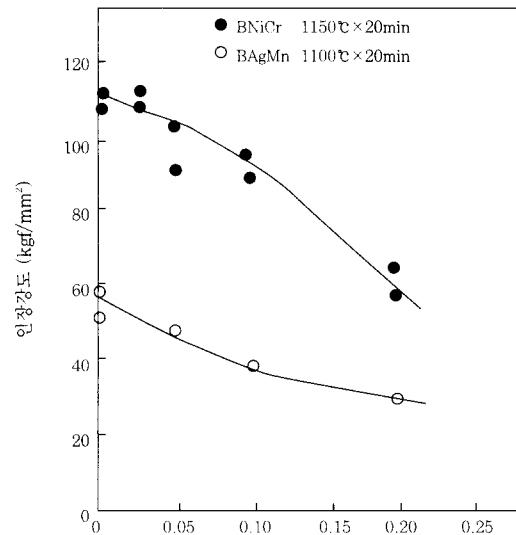


Fig. 2 삽입금속 두께와 접합강도와의 상관관계

3. 접합 간격에 영향을 미치는 인자

최대의 강도를 얻기 위한 접합부 간격을 결정할 때에는 다음과 같은 사항을 염두에 둘 필요가 있다. 동일한 간격에서도 플럭스 혹은 분위기, 모재의 표면상태 모재 및 삽입금속의 종류, 용융삽입금속과 모재와의 반응성, 접합부의 기하학적 형상 등에 따라서 접합강도가 변화하기 때문에 간격 설계 시에 이에 대한 고려가 필요하다. 특히 이종재료 간의 브레이징인 경우에는 팽창계수의 차를 고려하여야 한다.

Flux 및 분위기

플럭스는 삽입금속보다 용점이 낮아, 먼저 용융되어 접합부 내로 흘러 들어가 접합부 모재표면을 청정하게 하는 역할을 하고, 후에 모세관 현상으로 흘러 들어온 액상 삽입금속에 의해서 배출되고 대체된다. 따라서 접합부가 너무 좁으면, 플럭스는 접합부 내에서 억류되어 액상 삽입금속으로 대체하기가 힘들어 잔류하면, 개재물이 되므로 접합강도가 저하하는 원인이 된다. 따라서 접합부 간격을 약간 넓게 하는 것이 바람직하다. 그러나, 접합부 간격이 너무 넓어도 액상삽입금속의 유동력이 약화되어, 플럭스를 둘러싸게 되므로, 플럭스가 잔류하게 된다. 그림 3은 플럭스의 종류와 접합간격에 따른 접합강도 변화를 모식적으로 나타낸 것이다. 광물형의 플럭스보다 가스형의 플럭스가 좁은 간격에서 훨씬 높은 강도를 얻을 수 있음을 알 수 있고, 플럭스 종류에 따라서 적정 접합간격이 다름을 알 수 있다.

일반적으로 수직형 분위기로 사용하여 브레이징하는 경우, 액상삽입금속은 접합부 간격이 0.08mm 이

상이라도 자유롭게 흘러 들어갈 수 있다. 분위기는 사용하는 모재 및 삽입금속 표면에 존재하는 산화물의 제거 능력 혹은 산화물 형성 억제 능력에 좌우 될 것이다. 대체로 순도가 높은 건조 수소분위기와 같이 아주 양호한 분위기에서는 접합부 간격이 좁더라도 쉽게 흘러들어 가는 경향이 있다. 그러나, 유동성이 아주 좋은 삽입금속을 사용하고, 간격이 좁은 경우에는 오히려 액상삽입금속이 접합부를 빠져 나와 모재를 침식하는 문제가 발생할 우려가 있다. 한편 분위기가 불량하면, 액상 삽입금속의 유동도 불량하므로, 접합부 간격을 넓어야 할 것이다.

표 1은 삽입금속, 플럭스 및 분위기에 따른 적절한 접합부 간격을 나타낸 것이다.

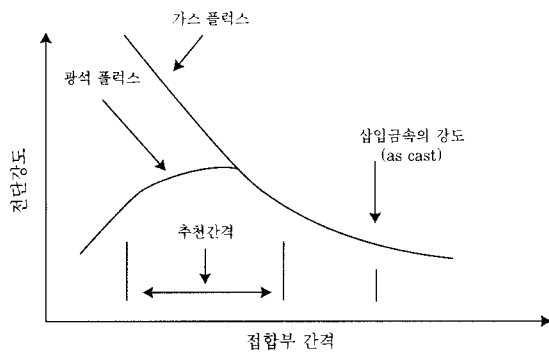


Fig. 3 접합부 간격, 플럭스와 접합강도와 상관관계 모식도

Table 1 브레이징 온도에서 적정 간격 (링, 플러그, 튜브, 부품)

삽입금속	접합간격	비 고
BAISi	0.05~0.20	6mm보다 짧은 접치기 이음
	0.20~0.25	6mm보다 긴 접치기 이음
BCuP	0.03~0.13	플럭스와 관계 없음
BAg	0.05~0.13	광물플럭스 사용
	0.00~0.05	분위기 브레이징 혹은 가스 플럭스 사용
BAu	0.05~0.13	광물 플럭스 사용
	0.00~0.05	분위기 브레이징
BCu	0.00~0.05	분위기 브레이징
BCuZn	0.05~0.13	광물 플럭스 사용
BMg	0.10~0.25	광물 플럭스 사용
BNi	0.05~0.13	일반적인 경우
	0.00~0.05	분위기 브레이징

표면조도

일반적으로 액상삽입금속은 모세관현상에 의해 흘러 들어가므로 표면조도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 표면조도(Rmax)가 낮은 매끄러운 모재표면의 경우, 액상삽입금속이 균일하게 분산되지 않아 보이드가 형

성되므로 접합강도가 저하한다. 반면에 표면조도가 너무 크면, 평균 접합부 간격이 넓어질 뿐만이 아니라, 접촉된 부분만이 브레이징이 되어, 역시 접합강도가 저하하는 요인이 된다.

특히 접합부내에서 액상 삽입금속의 적정 유동성을 확보하기 위하여, 접합부 간격을 0으로 하거나, 압력을 가하는 경우, 일반적으로 표면조도는 0.7-2.0 μ m 정도가 적당하다. 그러나, 모재/삽입금속의 조합, 접합조건에 따라 최적 표면조도가 다를 수 있으므로, 시험을 통하여 최적 표면조도를 조사할 필요가 있다. 또한 전처리 과정에서 브레이징 될 표면에 불순물이 부착하거나 오염에 의해 접합불량이 발생할 가능성 많기 때문에 주의할 필요가 있다.

삽입금속

용점이 일정한 순금속 및 공정합금인 삽입금속과 BCuP과 자체 플럭스 기능을 가진 삽입금속은 유동성이 좋기 때문에, 고액 공존 구간을 갖는 삽입금속 보다 접합부 간격을 좁게 하는 것이 좋다. 특히 모재와 용해 반응이 거의 일어나지 않는 삽입금속일수록 좁게 하는 것이 바람직하다.

모재

모재의 성분 중에 산화하기 쉬운 Al, Ti 등과 성분이 포함된 경우는 산화피막 때문에 용융삽입금속의 젖음성이 불량하게 된다. 따라서, 산화성이 강한 원소의 함유량이 많을수록 접합부 간격을 넓게 하여야 한다. 어떤 경우는 접합이 되지 않을 경우가 있다. 이러한 경우에는 브레이징 분위기를 환원성이 강한 고순도 건조 수소분위기 혹은 고진공 분위기로 하던가, 모재 표면의 산화를 방지하기 위하여 Ni 등으로 도금하는 것이 좋다.

모재/액상 삽입금속 반응

브레이징 시 모재와 액상삽입금속은 대부분 용해 반응이 일어나고, 원래 삽입금속의 조성이 변화하게 되고, 액상삽입금속의 유동성도 변화한다. 이 때문에 반응성은 최적 접합부 간격에 영향을 미친다. 결국 액상 삽입금속과 모재와 반응성이 적은 경우는 간격을 좁게 하고, 큰 경우에는 간격을 넓게 하는 것이 바람직하다.

접합부의 길이

접합부의 길이는 특히 액상삽입금속과 모재와 반응성이 있을 때 최적 접합부간격에 큰 영향을 미친다. 즉 접합부의 길이가 길면, 액상삽입금속이 접합부로 흘러 들어가 접합부 끝 지점에 도달하기 전에 응고할 가능성이 있다. 따라서 접합부의 길이는 가능한 한 짧게 하

는 것이 중요하다.

표 2 모재/삽입금속의 조합과 적정 접합부 간격을 나타낸 것이다.

Table 2 모재/삽입금속의 조합과 적정 접합부 간격 (단위 : mm)

삽입금속	강	동 합금	탄소강
BCu	-	-	0.05이하
BCuZn	0.07~0.38	0.07~0.33	0.05~0.25
BCuP	0.05~0.25	0.07~0.38	-
BAG	0.05~0.38	0.05~0.38	0.02~0.15

4. 이종재료 접합부의 간격의 설계

이종재료간 접합부 간격의 설계에서 가장 고려하여야 할 것은 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 문제점이다. 실제 브레이징은 상온에서 행하는 것이 아니라, 설정한 브레이징 온도에서 이루어지므로 열팽창계수 차를 고려한 브레이징 온도에서 간격을 설계하여야 하여야만 한다. 또한 모재의 열팽창계수 차이가 심한 경우에는 냉각시 수축응력에 의한 접합부에 잔류응력이 발생하여 접합부의 강도를 저하시킬 우려가 있다는 점을 고려하여야 할 것이다.

예를 들어 강제 슬리브 내에 황동재 부싱을 브레이징하는 경우, 그림 4와 같이 실온에서 간격을 0.05~0.08mm 범위로 가공하였지만, 실제 브레이징 온도에서 간격은 황동의 열팽창계수가 강보다 크므로, 이 간격보다 훨씬 좁게 된다. 역으로 황동 실리브 내에 강 부싱을 삽입하여 브레이징하는 경우, 그림 5와 같이 상온에서 간격을 딱 맞게 설정하더라도 브레이징 온도에서는 넓게 된다. 이것으로부터 이종금속간의 브레이

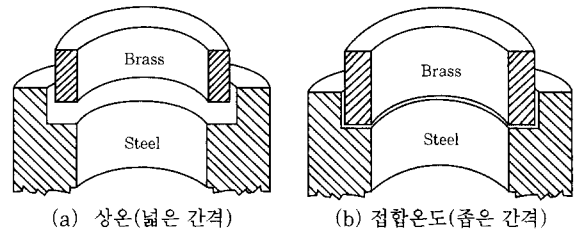


Fig. 4 강(외)/황동(내) 파이프 접합에서 온도에 따른 접합 간격 변화

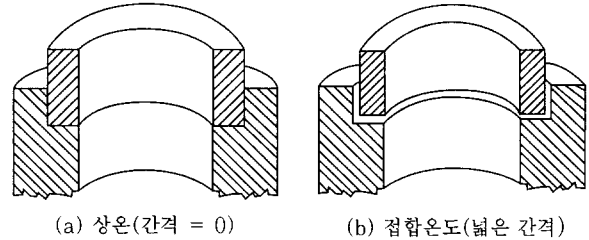


Fig. 5 강(내)/황동(외) 파이프 접합에서 온도에 따른 접합 간격 변화

징 시에 접합부 간격의 설계에서는 열팽창계수를 고려함과 동시에 접합하고자 하는 부품의 크기와 배열에 대해서 반드시 고려하여 한다는 점을 시사한다.

또한 모재의 열팽창계수 차이가 심한 경우에는 브레이징 공정 중에서 냉각시 수축응력으로 접합부에 잔류응력이 발생하고, 이 잔류응력은 접합부의 강도를 저하시키는 요인이 된다. 특히 세라믹스, 초경과 일반 금속재료를 브레이징하는 경우에 많이 발생하며, 잔류응력이 삽입금속의 항복강도보다 클 경우에는 균열이 발생한다. 이러한 경우에는 모재와 삽입금속 사이에 응력완화를 위한 연결금속 Cu, Ni 등을 스페이서로 삽입하여 접합하거나, 열팽창계수가 비슷한 금속을 완충재로 삽입하여 접합하여야 한다.



- 강정윤(姜晶允)
- 1953년생
- 부산대학교 금속공학과
- 확산접합, 브레이징, 솔더링, 용접야금
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr