

재료의 복합화와 구조화를 위한 소결확산접합기술 전개

박 용 호 · 강 정 윤

Sinter Diffusion Bonding Technology for Assembly and Hybrid of Materials

Yong-Ho Park and Chung-Yun Kang

1. 서 론

재료를 제조하고, 그 성질을 조사하는 것은 중요하다. 그러나 가장 중요한 것은 목적으로 하는 구조물이나 부품으로 재료를 복합화, 기능화, 구조화 하는 것이다. 더욱이 구조물이나 부품을 고부가가치화 하기 위해서는 그것을 구성하고 있는 재료에 기능을 가지게 하고, 용접접합 기술을 지능화한 지식융합형의 지적프로세싱공학으로 발전시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 재료과학과 가공의 물리학을 기초로 한 창의적 사고와 융합적인 사고를 요구하고 있다.

기능성 벌크재료의 제조는 우선 필요로 하는 재료가 이미 존재하는 재료로 만족할 수 없는 경우에는 Tailored Materials의 창제가 필요하다. 종래 소재가 없는 기능 특성을 만족하는 새로운 재료를 개발할 필요가 있다. 어떤 경우에는 이미 많이 사용되고 있는 Al, Fe, Cu 등과 같은 합금에 요구하는 내마모성, 내식성, 내산화성 내열성 등과 같은 특성을 필요한 부위에 국부적으로 기능을 비약적으로 향상 시키는 것이 생산성 및 생산 가격 면에서 유리하다.

한편 목적하는 기능을 갖는 구조물 혹은 제품을 제조하기 위해서는 요구되는 기능에 알맞은 소재로 구조화할 필요가 있다. 여기서 각각 재료의 기능을 중요시 하고, 필요에 따라서 국소적으로 기능화 한 재료를 구조화 하는 것에 의해, 기능통합적인 새로운 기능을 발현하는 구조물을 제조하는 지적생산기술의 창출이 요구되고 있다.

본 특집호에서는 재료과학적 관점에서 소성가공, 분말야금, 화학반응을 이용한 새로운 개념의 용접 접합기술의 연구에 대한 자료를 소개하고자 한다.

2. 고상확산접합의 원리

일반적으로 금속은 자유전자에 의한 금속결합을 하고

있다. 그림 1은 원자 간에 작용하는 힘과 원자거리와의 관계를 정성적으로 표시한 것이다. 2개의 원자가 아주 멀리 떨어져 존재할 때는 이 두 원자에 작용하는 상호 인력은 거의 0에 가깝지만, 접근함에 따라서 인력도 크게 작용하고 금속 결정 중의 평균 원자간 거리 1.5배가 되는 곳에서 최대가 된다. 더욱 원자가 상호 접근하면 인력과 척력의 크기가 같게 되고 에너지적으로 안정하게 된다.

확산접합은 가열 가압의 수단을 이용하여 고체 상태에서 양원자를 인력권 내에 접근시켜 양자를 금속결합시키는 것이다. 실제로는 이 상태를 달성하기 위해서는 금속표면이 완전 청결하고 평활하여야만 된다.

그림 2는 상온계면접합의 개념을 표시한 모식도¹⁾이지만, 표면의 오염층(산화물, 질화물, gas흡착층 등)을

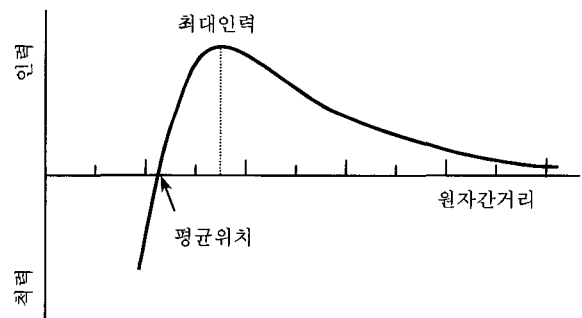


그림 1 원자간 거리에 따른 원자간 인력과 척력

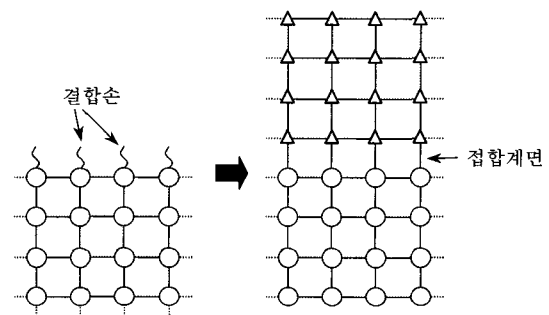


그림 2 상온확산접합 개념도

Ar Ion Etching 기술(표면청정화기술)로서 제거하여, 결함 손(Dangling bond)을 연결함으로써 상온에서 접합을 달성하고자 하는 것이다. 이와 같은 접합을 이루기 위해서는 표면의 초평활화 기술(수nm 이하), 청정화 기술, 초진공기술(10^{-9} Pa) 등이 필요하다.

그러나 실제의 금속표면은 현미경적인 시야에서 보면 요철이 존재하고, 또한 흡착층이 존재한다. 따라서 확산용접은 간단한 Model로서 검토할 수가 없다.

그림 3¹⁾은 확산접합의 접합과정을 모식적으로 표시한 것이다. 접합과정은 다음의 3과정으로 대별할 수 있다.

(1) 고온크리프 변형과정 : 가열과 가압에 의해 고온 크리프변형과 유사한 소성변형이 생겨 각종의 면피막이 파괴되고, 국부적으로 순수한 표면이 나타난다. 이 현상은 시간이 증가함에 따라 순수금속에 접촉하고 있는 면적이 증가하여 간다. 동시에 모재 상호간에 확산이동이 일어난다.

(2) 입계이동 및 보이드의 소멸과정 : 미접촉부는 가늘고 길게 잔존하던 보이드는 계면에너지, 즉 표면장력을 감소하기 위해 구상화 한다. 더욱 접합이 진행됨에 따라서 입계확산에 의해 보이드는 점점 소실하고, 선상의 입계가 에너지를 보다 안정 상태로 가기 위해 입계가 이동한다.

(3) 체확산에 의한 보이드의 소실과정 : 입계가 이동하고, 체확산에 의해 보이드가 거의 소실한다. 이 과정에서는 결정립의 성장이나 재결정현상이 생기는 경우가 많다. 각종 산화피막이나 표면피막은 일반적으로 고용하든가 미세화되고 모재에 분산한다. 그러나 이종금속간의 접합은 접합계면 근처에서 금속간화합물이 형성되는 경우가 많아 접합과정이 복잡하다.

3. 일반 소결확산접합 프로세스

그림 4는 소결확산접합 공정의 개략도를 나타낸 것이다. 외측부재(Outer)와 내측부재(Inner)를 각각 접합계면인 내경과 외경의 크기를 조정하여 조합한다. 압분체는 금형으로부터 빼어 내는 과정에서 금형 표면과 마주치기 때문에 표면 조도가 좋아야 한다. 또한 가압 방향과 직각방향의 크기는 금형 크기에 준하기 때문에 압분체의 조합은 다소 높아도 가능하다. 분말야금법의 하

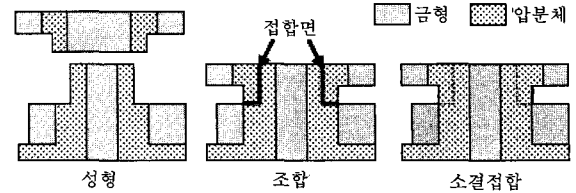


그림 4 소결확산접합 프로세스의 접합과정

나의 공정인 소결은 금형 중에서 가압성형 시킨 분말입자를 가열하고 분말입자 표면의 원자를 확산시켜 입자끼리 접합시키는 현상으로, 피접합 부재를 분말로 생각하면 고상확산 접합 현상과 거의 동일한 현상이다. 즉, 압분체를 조합 소결하면 고상 확산 접합에서 중요한 접합계면의 정밀도와 온도 조건을 만족한다. 나머지는 피접합체의 접합계면을 원자가 확산할 수 있는 상태까지 접근시키기 위한 압력이지만, 소결확산접합에서는 압분체 조합을 체결하고 밀착시키는 데에 필요한 외부 가압과 조합시킨 양부재의 소결과정에서 발생하는 열팽창량의 차이를 이용한다.

이러한 소결과정을 Fe-1.5Cu-0.7C와 Fe-1.5Cu-1.0C 압분체 조합으로 설명하면 다음과 같다²⁾.

그림 5²⁾는 양부재를 조합시킨 간격차와 접합강도와의 관계를 나타낸다. 내부 부재가 Fe-1.5Cu-1.0C 압분체이고, 외부 부재가 Fe-1.5Cu-0.7C 압분체 인 조합 A에서는 간격차가 $-10\mu\text{m}$ 에서 $+10\mu\text{m}$ 범위에서 최고 강도를 나타내고 있다. A와 반대로 조합시킨 B는

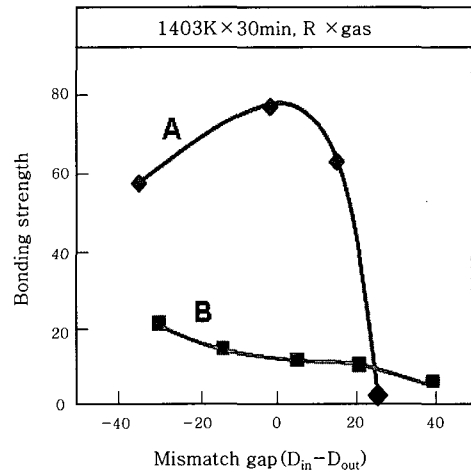


그림 5 소결확산접합 시 간격과 접합강도와의 관계

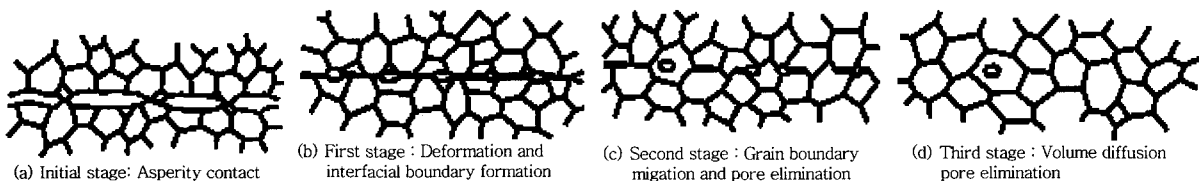


그림 3 고상확산접합의 접합과정 모식도

간격이 좁을수록 접합강도가 커지지만, 그 값은 아주 낮다.

이러한 이유를 양 부재 사이에 열팽창 현상으로 설명이 가능하다. 그림 6²⁾은 그림 5의 A와 B 조합의 소결 온도에 따른 치수 변형율을 나타낸 것이다. 그림 중에 H로 나타낸 O구역에서 이들압분체를 비교하여 보면, Fe-1.5Cu-0.7C가 Fe-1.5Cu-1.0C보다 소결 후의 팽창 양이 크다. 따라서 조합 A에서는 823K 이상의 온도 영역에서 Fe-1.5Cu-1.0C의 내부 압분체가 Fe-1.5Cu-0.7C의 외부 압분체보다 크게 팽창하여, 그 결과 양쪽 압분체는 접합면에 접촉하고 각 원소가 확산하여 접합이 이루어진다. 반면에 L에서는 Fe-1.5Cu-1.0C 외부 압분체가 내부 압분체보다 팽창하는 양이 크기 때문에, 고온영역에서는 접합면이 서로 접촉되지 않아, 접합이 이루어지지 않지만, 냉각과정에서 외부는 내부보다 크게 수축하므로, 어느 정도 압착에 의해 어느 정도의 접합강도가 나타난다.

4. 압분체/벌크의 소결확산접합 공정

최근에는 압분체 끼리의 소결확산접합 원리를 응용하여, 압분체와 벌크재 사이의 소결확산접합프로세스 개발이 시도되고 있다.

그림 7^{3),4)}은 그림 8과 같이 Fe-1.5Cu-0.7C 조성의 압분체를 외부부재로, 벌크재인 S45C 탄소강을 내부 부재로 하고, 윤활제로서 스테아린아연산을 사용하여, N₂가스분위기 중에서 소결접합한 경우, 접합조건과 접합강도와의 관계를 나타낸 것이다. 접합 시험편 모두가 높은 강도를 얻고 있음을 알 수 있다. 특히 접합온도가 높을수록, 소결시간이 길어질수록 접합강도는 높게 나타나고 있다.

그림 9²⁾는 Fe-1.5Cu-0.7C 조성의 압분체와 저탄소강 S45C를 N₂가스분위기에서 측정된 열팽창곡선을 나타낸 것이다. 벌크재 S45C를 질소가스 분위기에서

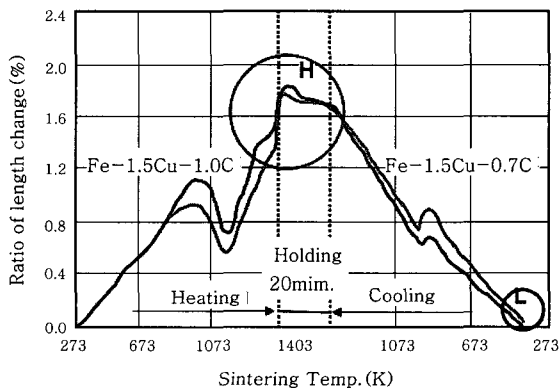


그림 6 가열 냉각 시 압분체 조성에 따른 열팽창 곡선 변화

측정한 열팽창곡선을 나타낸 것이다.

S45C강의 열팽창곡선에서는 A3변태점에서 수축한 후 승온 과정에서 다시 팽창하고 냉각 과정에서 수축한다. 그러나 압분체의 경우 각 입자의 팽창과 입자간의 접합에 의한 수축, 첨가원소의 확산에 의한 크기 변화에 따라서 형상변화가 이루어지므로, 반드시 일정한 양상을 나타내지 않는 것이 특징이다. 그래도 수축의 진행함에 따라 곡선은 수축방향으로 변화한다. 이 결과로부터 압분체/벌크재(강)을 접합하더라도 소결확산접합

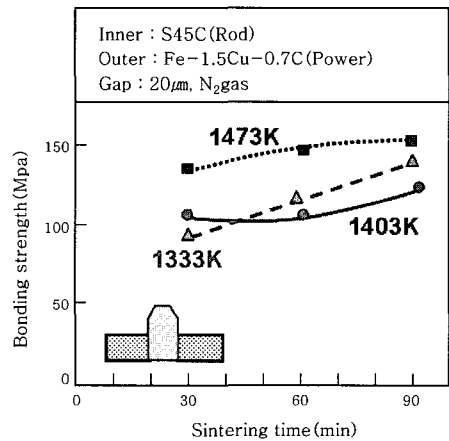


그림 7 S45C(Bulk)/Fe-Cu-C압분체의 소결확산접합 시 접합조건에 따른 접합강도의 영향

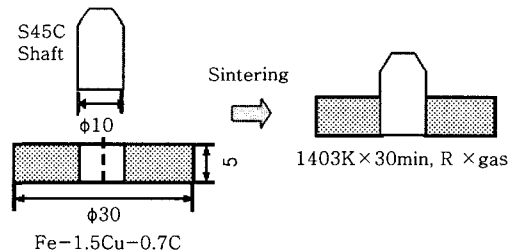


그림 8 벌크재 S45C(inner)/Fe-Cu-C 압분체(inner) 소결접합 시험편 형상 및 접합조건

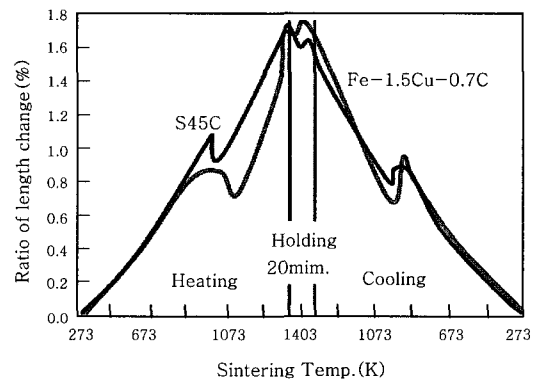


그림 9 가열 냉각 시 압분체(Fe-Cu-C)와 벌크재(S45C)의 열팽창 곡선

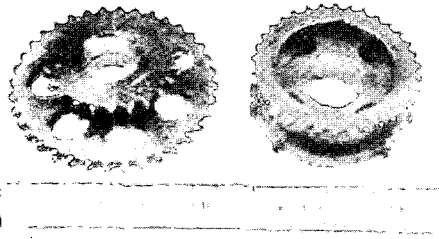


그림 10 압분체(Fe-Cu-C) 소결확산접합에 의한 자동차 부품제조 예

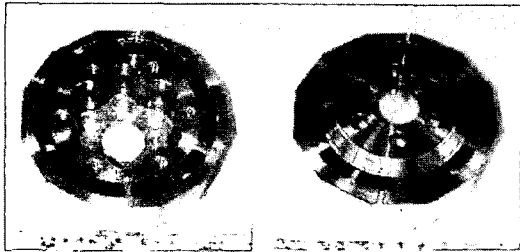


그림 11 소결확산접합에 의한 하이브리드 자동차용 모터 코어의 복합 기능화 예

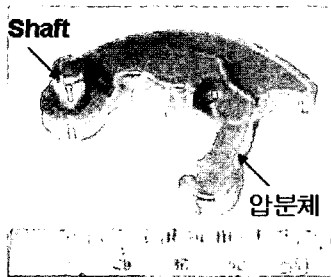


그림 12 압분체(Fe-Cu-C)/벌크(S45C) 소결확산접합에 의한 오토바이 부품 제조 예

이 가능하다는 것을 알 수 있다.

한편 소결확산접합 시 질소 분위기를 사용하지 않고, RX가스 분위기 중에서 실시한 경우에는 접합강도가 안주 낮고, 거의 접합이 이루어지지 않았다. 이것은 RX가스와 스테아린아연산과의 소결과정에서 이상 팽창현상이 발생하기 때문인 것으로 밝혀졌다.

반면에 이 이상 팽창현상을 이용하여 스테아린아연산을 함유한 Fe-Cu-C계 압분체를 내부부재로 하고 벌크강재를 외부부재로 조합하여 RX가스 분위기에서 소결확산접합이 가능하였다.

이미 약 10년 전부터 압분체/압분체의 소결확산접합 공정은 자동차 부품에 적용되어 왔지만, 다양한 압분체와 벌크재와의 확산접합이 가능하여 향후 이 방법을 이용한 부품제조가 확대 될 것으로 전망된다. 그림 10⁵⁾은 자동차 부품의 적용예를 나타낸다. Fe-Cu-C계 조성의 압분체끼리 조합하여 소결확산접합시킨 것이다.

그림 11⁵⁾은 하이브리드 자동차용 모터에 로터코어 기능을 복합화하는 목적으로 소결확산접합을 적용한 예이다. 로터는 엔진의 크랭크축에 직결되기 때문에 내부부재는 고강도이어야 함으로 Fe-Cu-C계 조성의 소결재로 제작한다. 외부부재는 그 표면에 요크 역할을 하여야 하므로, 연질의 자기특성을 지닐 필요가 있다, 그래서 순철의 소결재로 구성되어 있다.

그림 12²⁾는 벌크 강재의 축과 압분체와의 소결확산접합한 예이다. 오토바이 SDB 부품의 경우, 종래에는 축을 소결체에 압입하고 체결하는 방법으로 제조하였지만, 최근에는 접합부의 신뢰성을 향상시키기 위하여 현재는 소결확산접합법을 적용하고 있다.

참 고 문 헌

1. W.H.King, etc : Weld. J.,(1968) 444s
2. K. Asaka : J. of Japan welding Society, 72-1(2003) 57
3. K. Asaka : Advanced in Powder Metall. & Pract. Materials, 95-3(1999) 106
4. K. Asaka : Advanced in Powder Metall. & Pract. Materials, 96-3(2000) 832
5. A. Fujiki : SAE Paper No. 950390(1995)
6. T. Komatsu : Honda R&D Technical Review, 14-1 (2002), 257



- 박용호(朴容浩)
- 1959년생
- 부산대학교 재료공학과
- 분말야금학, Alloy Design
- E-mail: yhpark@pusan.ac.kr



- 강정윤(姜鼎允)
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 접합공학, 계면미세조직제어
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr