

수중 충격파를 이용한 스테인레스 스틸과 마그네슘합금의 폭발용접에 관한 연구

이준오, 김영국*, 조상호

Underwater Explosive Welding of Stainless Steel and Magnesium Alloy

Joon-Oh Lee, Young-Kook Kim*, Sang-Ho Cho

Abstract Magnesium is one of the light weight materials, which can improve fuel economy and reduce emissions in automotive industry. Recently, magnesium alloys have gained considerable attention due to good mechanical properties. In this work, we have performed an explosive welding using the magnesium alloys (AZ31) and stainless steel (SUS 304). As a result, SUS304/AZ31 were successfully combined each other; however, a resolidified interlayer was observed at the point of welded layer. To reduce the resolidified interlayer, we have changed the thickness (0.5 mm and 1 mm) of stainless steel, distance (45 mm and 60 mm) between explosive and the center of materials and initial angle (20° and 30°) of explosive. In the case of the thickness 0.5 mm and angle of 30°, the resolidified interlayer was not observed due to the increase of distance from the explosive. To accurately estimate the resolidified interlayer, electron probe micro-analyzer (EPMA) method and hardness were used. For the EPMA analysis, mixed materials were confirmed at the resolidified interlayer, and the measurement exhibited the middle value compared with the AZ31 and SUS304.

Key words Explosive welding, Underwater shock wave, Magnesium alloy (AZ31), Stainless steel(SUS304)

초 록 마그네슘 합금은 경량화 재료로서 많은 주목을 받고 있으나, 스테인레스 스틸과의 접합이 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 수중충격파를 이용하여 스테인레스 스틸(SUS304)과 마그네슘 합금(AZ31)의 폭발용접을 수행하고 접합특성에 관한 분석을 수행하였다. SUS304의 두께는 0.5 mm와 1 mm를 사용하였으며, 폭약과 재료의 이격거리는 45 mm, 폭약의 설치경사는 20°로 하여 실험한 결과, 두 재료의 접합면에서 중간층(resolidified interlayer)이 형성되었다. 중간층의 형성을 억제하기 위하여 폭약과 재료의 거리를 60 mm로 증가시켰으며 폭약의 경사는 30°으로 변경하여 폭발용접실험을 수행하였다. 그 결과, 폭약과 재료 사이의 간격과 경사각이 증가함에 따라 중간층이 나타나지 않는 경향을 보였다. 이 중간층에 대하여 EPMA분석한 결과, 중간층은 두 금속의 재료가 혼합되어 있는 것으로 확인 되었으며, 경도는 두 금속의 평균 경도에 해당 됨이 확인 되었다.

핵심어 폭발용접, 수중충격파, 마그네슘 합금, 스테인레스 스틸

1. 서 론

최근 자동차 및 건설장비의 경량화를 위해서 새로운 경량부품 제조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마그네슘 합금은 경량화 재료로서 매력적이고 우수한 기계적 강도를 가지고 있기 때문에 많은 관심을 가지고 있는 재료이다¹⁾. 특히, 알루미늄과 같은 가벼운 금속을 마그네슘과 접합시킴으로써 차량의 총 중량을 상당히 줄일 수 있고²⁾, 연료 효율 또한 높일 수 있다. 스테인레스 스틸 (stainless steel)과 마그네슘(magnesium)의 접

Received: June 21, 2012

Revised: June 25, 2012

Accepted: June 27, 2012

*Corresponding Author: Young-Kook Kim

Tel) +82632704636, Fax) +82632704636

E-Mail) chosh@chonbuk.ac.kr

Department of Resources and Energy Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, deokjin-gu, jeonju-si, Jeollabuk-do 56-756, Korea

합 또한 차량의 경량화에 좋은 재료로 사용이 가능하다. 하지만, 마그네슘과 스테인레스 스틸의 접합은 두 금속의 특성과 용융점의 차이로 일반적인 용접방법으로는 접합시키기 어려운 문제점을 가지고 있다.

충격파를 이용한 용접기술은 일반적인 용접으로 불가능한 접합을 가능하게 해준다³⁾. 이 기술은 폭약의 폭발에 의해 발생하는 고속·고압력의 충격파를 이용하여 두 금속을 접합시키기 때문이다. 근래에는 수중폭발용접기술이 확대되고 있다^{4),5)}. 이 기술은 두 재료가 순간적인 속도로 냉간 압착되기 때문에 재료에 열 영향을 거의 미치지 않으므로, 종래의 폭발용접기술로 접합시키기 어려운 수십 μ m의 얇은 판이나 취성재료의 접합이 가능하다. 수중폭발용접의 원리는, 고성능 폭약을 재료에 대해 적절한 경사도와 거리를 준 상태로 물속에 배치해, 폭약의 폭발에 의해 발생하는 수중충격파가 균일한 압력분포로 전파하여 부재(flyer plate)를 모재(base plate)에 강하게 충격 압착시키고, 부재가 모재에 압착될 때, 두 금속의 접합면은 순간적으로 용융되어 접합이 이루어지는 것이다.

본 연구에서는, 스테인레스 스틸(SUS304)과 마그네슘합금(AZ31)에 수중폭발용접기술을 적용하여 두 금속의 접합을 수행하였다. 다양한 접합조건(거리, 두께, 경사각도)에 따른 두 금속의 접합특성을 분석하고, 접합경계에 혼합층이 발생되지 않는 조건을 파악하고자 한다.

2. 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도와 장치사진을 나타낸 것이다. 마그네슘 합금인 AZ31을 모재(base plate)로 사용하였고, 스테인레스 스틸의 종류인 SUS304를 부재(flyer plate)로 사용하였다. SUS304는 0.5 mm와 1 mm

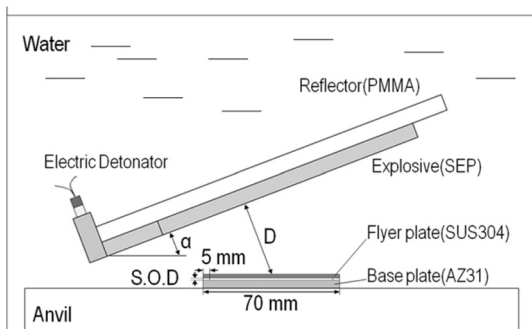
의 두께를 각각 사용하였고, AZ31은 3 mm의 두께를 사용했다. 두 재료의 길이와 폭은 각각 70 mm와 50 mm이다. 그리고, 두 금속 사이의 간격은 0.2 mm로 정하여 실험을 실시하였다. 여기서 폭약과 접합재료의 거리는 45 mm, 폭약의 설치 경사는 20°이다.

본 실험에서 사용된 고성능 폭약(SEP)은 Japan Kayaku로부터 제공 받았다. 폭약의 밀도는 1,310 kg/m³이고, 폭발속도가 6,970 m/s이다. 폭약은 아크릴(PMMA)에 5 mm 두께로 접합시켜 전기 뇌관에 의해 기폭을 시켰다.

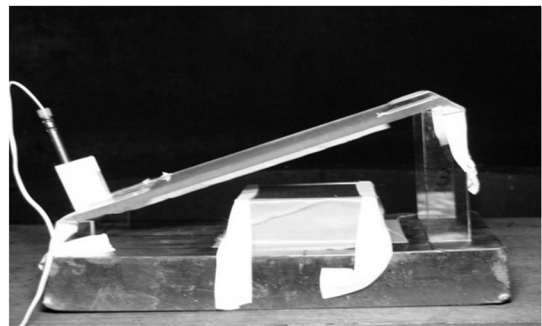
3. 실험 결과

Fig. 2는 SUS304와 AZ31의 수중 폭발용접 결과로써, SUS304의 두께가 각각 0.5 mm와 1 mm인 경우의 접합면에 대한 광학현미경 확대화상을 보여주고 있다. 접합경계면은 두 금속 사이의 평평하게 형성되었다. 폭발압착에서, 충돌각도와 충돌속도가 최적일 경우, 접합면은 물결 모양의 접합면을 만드는 것이 일반적이지만, 두 금속의 기계적 특성차이로 평평한 접합면이 이루어지는 경우도 나타난다. 이런 경우, 재료는 열 영향을 받지 않으므로 두 금속의 혼합물이 존재하는 혼합층(resolidified interlayer)이 생긴다. 이 혼합층은 접합점에서의 충격압착속도(plate collision velocity)가 매우 빠르게 진행되어 두 재료가 접합할 때 생기는 금속제트(metal jet)가 생기지 않아 발생된다⁶⁾.

본 실험에서 모든 접합면이 평평한 접합면으로 확인되었다. 그리고, 이 접합면은 얇고 어두운 색의 층을 나타내고 있는데, 얇은 층이 혼합층에 해당된다. 즉, AZ31/SUS304의 접합에서 금속간 화합물은 형성되지 않았다고 볼 수 있다. 압착 시, 용점의 차이로 인해 밀도가 낮은 AZ31이 접성이 높은 유체처럼 움직였을 가능성이 크다. 실험 후, 접



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Schematic illustration of explosive welding (magnesium alloys and stainless steel) using underwater shock wave and (b) photograph of explosive welding experiment set up

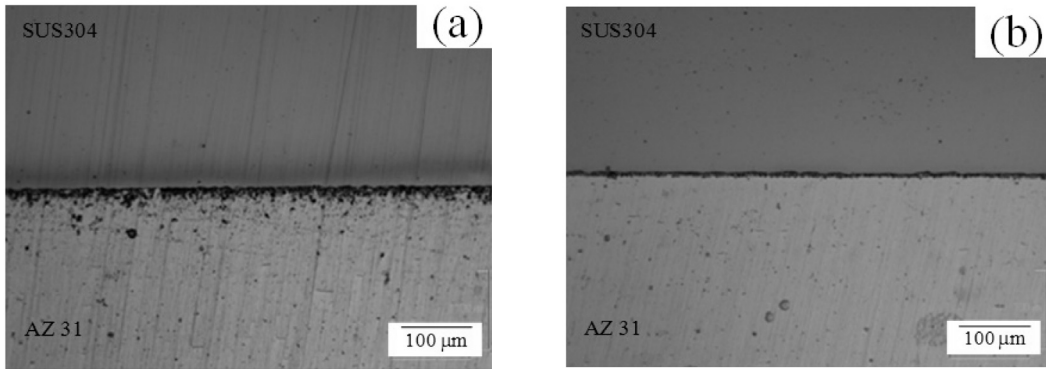


Fig. 2. Optical micrograph of stainless steel/AZ31 magnesium for D=45 mm, angle=20° and thickness of (a)1 mm stainless steel and (b) 0.5 mm stainless steel

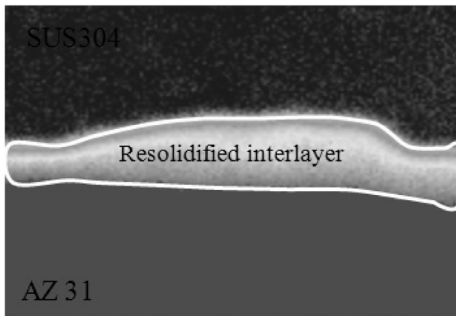


Fig. 3. Elemental mapping of welded interface using EPMA

합면에 대한 전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)과 전자현미분석기(Electron Probe Micro-Analyzer, EPMA) 및 광학현미경(Optical Microscopy, OM) 분석

을 수행하여 접합면 및 접합면 주변에 대한 미세조직특성을 분석하였다.

Fig. 3은 접합면에 생긴 혼합층의 원소조성을 확인하기 위해 전자현미분석기를 이용하여 마그네슘과 철(Fe)의 원소분포를 나타낸 것이다. 분석결과, 혼합층은 두 금속의 화합물이 아닌 두 금속이 혼합되어 있는 것으로 확인되었다. 그리고, 혼합층에는 마그네슘이 훨씬 더 많이 존재하고 있는 것이 확인되었고, 화학적 성분분석결과에서 마그네슘과 철의 비율이 각각 91%과 8%로 나타났다. 접합면에 대한 비커스(Vickers)경도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 두 금속이 접합 후 경도 값이 변화되고 있는 것이 확인되었고, 접합면 근처의 경도 값은 가장 높은 경도 값을 나타내었고, 접합면에서 점점 멀어질수록 경도 값이 낮아지는 것을 확인하였다. 혼합층의 경도측정결과, 두 금속이 혼합되어 있

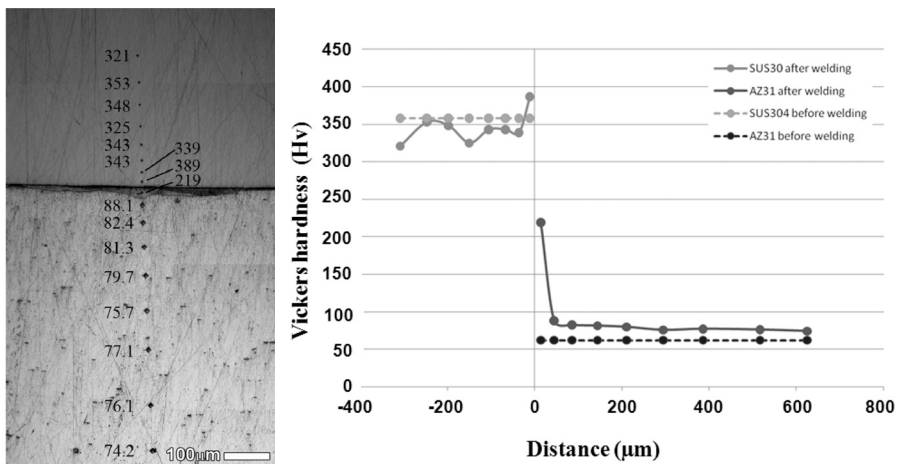


Fig. 4. Vickers hardness across the welded interface

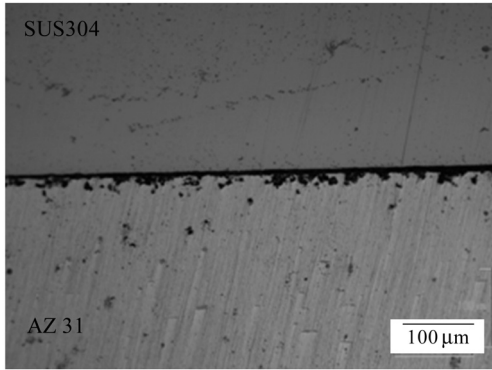


Fig. 5. Optical micrograph of thickness 0.5 mm stainless steel/AZ31 magnesium for D=45 mm, angle=30°

때문에 SUS304와 AZ31의 중간 정도의 값을 나타내고 있다.

4. 수중폭발용접에 의한 혼합층 형성 억제실험 및 고찰

금속간 화합물이 형성되지 않더라도 혼합층이 없는 접합면을 제조하는 것이 필요하므로, 충격압착속도가 느리게 진행하도록 접합 실험조건을 변경하여 폭발실험을 실시하였다. 특히, 폭약과 재료의 경사각이 30°인 경우 접합면이 파도 형상으로 나타나고, 양호한 접합이 이루어지는 것으로 알려져 있어, 폭약의 경사각을 30°으로 고정시켜 폭발용접실험을 추가적으로 수행하였다. Fig. 5는 경사각 30°각도에서 폭약과의 거리를 45 mm 하고, 두께 0.5 mm의 SUS304와 AZ31의 접합면에 대한 광학현미경으로 촬영된 확대화상이다. 초기의 접합점으로부터 25 mm까지는 혼합층의 존재와 평평한 접합면을 보여주고 있지만, 25 mm 이후부터는 접합되지 않았다. 혼합층을 줄이기 위해 폭약과 AZ31의 이격 거리를 60 mm로 늘려 두께 0.5 mm의 SUS304와 각도를 30°로 하여 실험을 실시하였다. 그 결과, 거리가 증가함에 따라 운동 에너지 손실이 증가하면서 혼합층의 형성을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. Fig. 6은 이격 거리가 60 mm인 경우의 접합면 미세구조를 보여주고 있다. 혼합층이 보이지 않는 평평한 접합면이 확인되었다.

수중충격파를 이용한 폭발용접법에 있어, 장치의 기하학적 조건으로부터 접합 시에 중요한 충돌각도와 충돌속도를 찾는 접합가능 최적조건에 대한 계산법이 알려져 있다⁷⁾. 수치해석코드를 기초로 한 계산법을 이용하여 실험조건에 대한 계산을 실시했고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 높은 압력과 큰 충돌각 및 충돌속도로

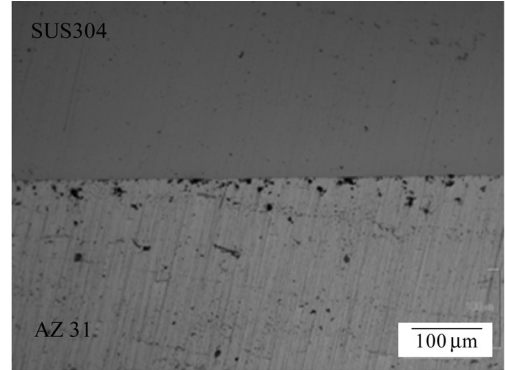


Fig. 6. Optical micrograph of 0.5 mm stainless steel/AZ31 magnesium for D=60 mm, angle=30°

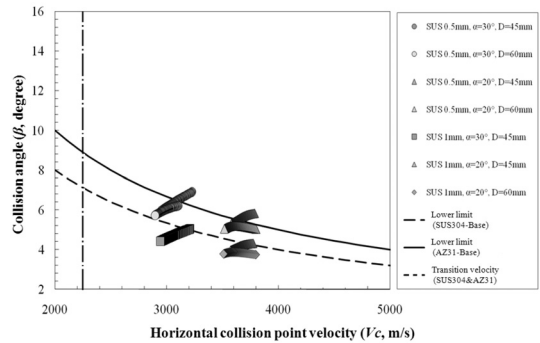


Fig. 7. Weldability window of SUS304/AZ31

접합되었을 경우와 낮은 압력과 낮은 충돌각 및 충돌속도로 접합했을 경우의 결과를 연속적인 점으로 나타내었다. 그 결과, 본 연구에서 실험한 모든 조건이 접합가능 최소경계선 (lower limit)보다 아래에 분포되어 있는 것이 확인되었다. 결국, 이론적으로 접합은 가능하지만, 접합면에는 수중 폭발용접의 특유한 파상형태의 계면을 가지지 못하고, 혼합층이 존재할 가능성을 보여주고 있다. 본 실험연구결과는 수치해석결과와 동일하게 접합체의 경계면상에 파상계면이 나타나지 않았으며, 평평한 계면을 유지하며 두 금속 간에 혼합층이 존재하고 있다. 이것은 본 실험방법 및 결과에 대한 유효성을 입증하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수중충격파를 이용한 스테인레스 스틸 (SUS304)과 마그네슘 합금(AZ31)의 폭발용접을 수행하였다. 그 결과를 나열하면 다음과 같다.

1. 폭약과 재료의 이격거리가 45 mm, 폭약의 설치경사는 20°인 경우, 두 재료의 접합면에 혼합층(resolidified interlayer)이 형성되었다.
2. 혼합층의 형성을 억제하기 위하여 폭약설치 경사가 30°에 대한 폭발용접실험을 수행하였다. 그 결과, 초기의 접합점으로부터 25 mm까지는 중간층의 존재와 평평한 접합면을 보여주고 있지만, 25 mm 이상에는 접합이 이루어지지 않았다.
3. 폭약과 재료의 이격 거리를 60 mm, 폭약과 재료의 각도를 30°로 하여 추가 실험한 결과, 혼합층이 나타나지 않은 평평한 접합 면을 얻었을 수 있었다.
4. 수중충격파를 이용한 폭발용접법에 의해 SUS304와 AZ31은 성공적으로 접합이 이루어졌다. 접합면에 대한 특성분석 결과, 대부분의 실험에서 접합면은 폭발용접 특유의 파형 접합면이 아닌 평평한 접합면을 보였다. 일부 조건에서 접합면에 화합물이 아닌 혼합물로 이루어진 혼합층이 형성되었다. 이 혼합층에는 마그네슘 원소가 많이 분포되어 있는 것이 확인되었다. 그리고 경도 값 또한 AZ31과 SUS304의 중간 정도의 경도 값을 나타내었다. 이 결과로 마그네슘 합금과 또 다른 금속과의 접합도 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Mordike B. L., T. Ebert, 2001, Magnesium: Properties-applications-potential, Materials Science and Engineering: A, 302, 37-45.
2. Sato Y. S., S. H. C. Park, M. Michiuchi, H. Kokawa, 2004, Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys, Scripta Materialia, 50, 1233-1236.
3. Akbari-Mousavi S. A. A., L. M. Barrett, S. T. S. Al-Hassani, 2008, Explosive welding of metal plates, Journal of Materials Processing Technology, 202, 224-239.
4. Akbari-Mousavi S. A. A., S. T. S., 2005, Al-Hassani, Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53, 2501-2528.
5. Hokamoto K., Y. Ujimoto, M. Fujita, 2004, Basic characteristics of the explosive welding technique using underwater shock wave and its possibilities, Materials Transactions, 45, 2897-2901.
6. Hokamoto K., M. Fujita, H. Shimokawa, H. Okugawa, 1999, A new method for explosive welding of Al/ZrO₂ joint using regulated underwater shock wave, Journal of Materials Processing Technology, 85, 175-179.
7. Akbari-Mousavi S. A. A., P. Farhadi Sartangi, 2009, Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel, Materials & Design, 30, 459-468.

이 준 오



2005년 배재대학교 세라믹공학과
2008년 구마모토대학 복합신영역과학
전공 석사

Tel: 080-3229-4397
E-mail: ban1052@gmail.com
현재 구마모토대학 복합신영역과학전
공박사과정

김 영 국



1998년 부경대학교 기계설계학과 공학사
2002년 부경대학교 대학원 기계공학과
공학석사
2008년 일본 구마모토대학 자연과학 연
구과 공학박사

Tel: 010-7150-6333
E-mail:
kim@shock.smrc.kumamoto-u.ac.jp
현재 구마모토 대학 충격극한환경연구
센터 특별연구원

조 상 호



1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과
학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과
석사
2003년 북해도대학교 대학원 공학연구과
박사

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수