

금속 샌드위치 판재 대면적 롤 프로젝션 용접에 관한 연구 :
Part 1 - 공정 모니터링

안준수 · 김종화 · 나석주 · 임지호

금속 샌드위치 판재 대면적 롤 프로젝션 용접에 관한 연구 : Part 1 - 공정 모니터링

안준수* · 김종화** · 나석주*† · 임지호***

*한국과학기술원 기계공학과

**STX 조선 생산기술연구팀

***POSCO 기술연구소

A Study on Large Area Roll Projection Welding for Metallic Sandwich Plate : Part 1 - Process Monitoring

Junsu Ahn*, Jong-Hwa Kim**, Suck-Joo Na*† and Jiho Lim***

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Production Technology Research Team, STX Shipbuilding, Changwon 641-839, Korea

***Technical Research Labs., POSCO, Gwangyang 545-090, Korea

†Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received March 3, 2009 ; Revised March 30, 2009 ; Accepted June 2, 2009)

Abstract

A roll projection welding machine is introduced to fabricate metallic sandwich plate consisting of a structured inner sheet with projection-like shape and a pair of skin sheets. To fabricate the metallic sandwich plate of consistent and good quality, two process monitoring methods are introduced; dynamic resistance monitoring and skin sheet temperature monitoring. Dynamic resistance monitoring has no time delay but gives only averaged value over plate width. Skin sheet temperature monitoring has certain amount of time delay but is good for predicting weld quality of specified position. By the two complementary monitoring methods, the characteristics of the new welding process is successfully understood.

Key Words : Metallic sandwich plate, Roll projection welding, Inner structure, Roll electrode, Process monitoring

1. 서 론

최근 자동차 등 산업 각계에서 경량, 고강도 등 고기능성 금속 소재에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 대한 요구를 충족하고자 하는 연구들은 주로 합금 기술 개발, 열처리 기술의 향상 등 소재기술 측면에서 이루어져 왔으나, 최근에는 면재 사이에 가벼우면서도 충분한 구조강도를 제공하는 내부재를 삽입하여 제작하는 금속 샌드위치 판재에 대한 연구 또한 주목을 받고 있다.

현재까지 금속 샌드위치 판재의 제작 공정으로는 접

착제를 이용하는 방식이 주로 사용되어 왔다. 그러나 접착제를 이용할 시 공정이 복잡해지며, 이종 재료의 혼입으로 인해 친환경적인 재활용에 제약이 많다.

이에 금속으로만 구성된 샌드위치 판재의 제작에 관한 연구들이 수행되었는데, 발포 금속을 내부재로 사용하여 외판재와 확산접합, 압연 클래딩 등으로 접합하거나^{1,2)} 발포 금속 표면에 용사를 통해 피막을 형성하는 방법³⁾ 등이 연구되었다. 또한 3차원 구조체를 내부재로 사용하는 경우 사출성형이나 캐스팅과 같은 정밀 주조기법을 이용하여 내부 구조재와 외판재를 동시에 성형하거나^{4,5)} 천이 액상 접합법(transient liquid

phase bonding)을 이용하여 내부 구조재와 외판재를 접합한 사례⁶⁾가 있다. 그러나 이와 같은 제작법들은 주로 이상적인 금속 샌드위치 판재의 성능을 시험하기 위한 제한적인 용도로서 사용되었으며, 양산을 위한 제작 공정으로서는 일정한 한계를 가지고 있다.

최근 롤전극을 이용하여 연속적인 저항 프로젝션 용접을 수행함으로써 3차원 구조를 갖는 내부 구조재와 외판재를 접합하여 금속 샌드위치 판재를 생산하는 용접 장치가 개발되었다⁷⁾. 본 연구에서는 연속 저항 프로젝션 용접시 발생하는 여러 양상을 모니터링함으로써 공정의 특성을 파악하고, 적정 용접 조건을 도출하여 판재의 성능을 향상시키고자 하였다. 이를 위하여 일반적인 저항 용접 공정 모니터링에 널리 사용되는 동저항 측정법과 함께 표면 온도 측정법을 도입하여 공정을 모니터링 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

금속 샌드위치 판재를 연속적으로 용접하는 롤 프로젝션 용접 장치는 Fig. 1과 같이 회전하는 1쌍의 롤전극 사이에 2장의 외판재와 1장의 내부 구조재로 이루어진 판재를 통과시키며 통전하여 용접하는 방식을 채택하고 있다.

본 연구에서는 용접 후 판재 두께가 약 3mm가 되도록 하며, 곡률반경 10mm로 90°의 굽힘각도로 성형시 외판재의 좌굴 및 용접부의 파단이 발생하지 않도록 하는 것을 주된 성능 목표로 하였는데, 선행연구^{8,15)}를 통하여 도출된 형상의 내부구조재를 사용하는 경우 이를 달성할 수 있다고 보고되었으므로¹⁵⁾, 본 연구에서는 보고된 내부구조재를 사용하였다. 이 내부구조재는 0.5mm 두께의 연강판을 프레스 성형한 것으로서 양쪽면에 돌기를 갖는데, 딴플(dimple) 형상의 내부 구조재⁸⁾로부

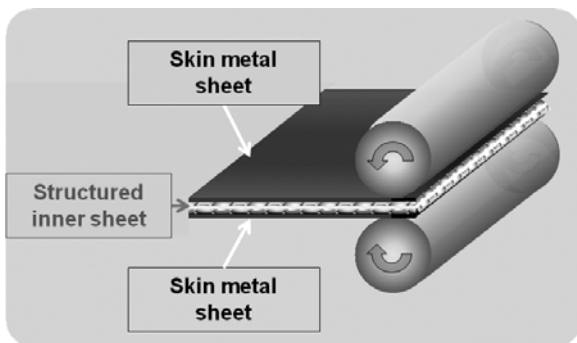


Fig. 1 Schematic diagram of roll projection welding

터 개량된 것이어서 전단형 딴플(sheared dimple)이라고 명명되었다. 본 연구에 적용된 전단형 딴플 내부 구조재는 한쪽면의 돌기부 높이 0.75mm, 두께 2mm (양쪽면 돌기부 높이 포함), 패턴간격 2.4mm의 형상을 갖는다.

또한 외판재는 자동차용 고장력강인 두께 0.5mm의 DP590 및 범용 스테인리스강인 STS304를 사용하였다. 이에 따라 접합 전의 금속 샌드위치 판재의 두께는 3mm이고, 접합된 판재의 두께는 용접 조건에 따라 2.8~2.9mm로 감소하게 된다.

판재의 폭은 270mm, 길이는 1250mm 및 2500mm로 재단하여 사용하였다.

2.2 판재의 이송 및 가압

외판재와 내부 구조재를 정렬하여 전극 사이로 투입하면 전극 간격이 좁아지면서 판재가 가압된다. 그 후 전극이 회전함에 따라 마찰력에 의해 판재가 이송된다.

전극으로 판재를 가압할 때 전극 간격이 너무 멀어 하중이 부족하면 전극과 외판이 충분히 접촉되지 않아 전극-외판 계면의 접촉저항이 상승하여 통전시 외판에 발열이 집중되므로 외판의 손상을 야기한다.

전극 간격이 가까워지면 가압 하중 증가에 따라 내부 구조재와 외판재 사이의 접촉이 점차 공고해지고 접촉 저항이 낮아진다. 결과적으로 전류밀도가 하락하여 줄열(Joule heat)이 충분치 않게 된다. 전류를 증가시켜 전류밀도 하락을 보상해 줄 수 있으나, 반구형의 형상을 갖는 전단형 딴플 내부 구조재는 가압에 따라 접촉면적이 크게 증가하는 특성을 가지므로 약간의 가압 하중 증가를 보상하기 위한 전류량조차도 상당히 커지게 된다. 따라서 전류 상한치를 미리 설정함으로써 용접 장치의 전류 공급 능력을 초과하지 않도록 한 후, 가압량을 조절하여 적정 용접 조건을 선정하였다.

판재를 가압하는 방식으로는 두 가지를 채택하였다. 첫 번째는 용접전에 미리 상하 롤전극의 회전축간 거리를 결정하고 용접중에도 그 축간 거리를 유지하는 방식(축간거리고정)이고, 두 번째는 로드셀을 통해 용접중에 전극을 가압하는 하중이 일정하게 유지되도록 피드백 제어하는 방식(하중제어)이다. 이 중 하중제어 방식이 축간거리고정 방식에 비하여 양호한 결과를 나타냈으며, 이는 4장에 기술할 모니터링 결과를 통하여 확인할 수 있다.

2.3 판재의 용접

본 연구에 사용된 용접 장치는 380V, 60Hz, 3상의

교류 전원을 사용한다. 용접 전류는 SCR(silicon controlled rectifier)에 의해 3상 위상제어되며 물전극에는 직류로 정류되어 공급된다. 폭 270mm의 금속 샌드위치 판재를 용접하는 경우 최대전류는 70kA로 설정하였으며 2사이클의 통전기와 7사이클의 휴지기를 갖는 펄스 형태로 연속 통전된다. 내부 구조재의 패턴 간격을 l (mm), 통전 사이클을 C_{run} , 휴지 사이클을 C_{rest} , 용접속도(판재이송속도)를 v (mm/s)라 하면 다음과 같은 관계식을 통해 용접속도를 산출할 수 있다.

$$v = M \cdot \frac{fl}{C_{run} + C_{rest}} \quad (1)$$

M 은 통전 빈도를 나타내는 계수로써, 가령 내부 구조재의 매 패턴마다 한 번씩 통전하는 경우 1이며, 한 패턴당 두 번씩 통전하는 경우 0.5가 된다. f 는 교류 전원의 주파수(Hz)이다. 이 관계식에 따라 내부 구조재의 패턴 간격, 통전 및 휴지 사이클, 용접속도 등을 조절하여 기하학적으로 일정한 지점에 통전이 이루어도록 하였다. 본 연구에서는 $M=0.75$ 를 적용하여 3패턴당 4번 통전되도록 하였으므로 용접속도는 12mm/s이 된다.

3. 공정 모니터링

연속 용접장치를 이용한 접합공정에서 중요한 공정변수로는 전류, 통전시간, 판재에의 가압량, 용접속도, 통전위치 등이 있다. 여기서 통전위치라 함은 매 펄스의 통전 개시 순간에, 굴곡을 갖는 내부구조재의 꼭지점이 상/하 물전극의 두 회전 중심을 잇는 가상의 기준선에서 벗어난 정도를 의미한다.

본 연구에서 통전시간은 2사이클로 설정하였으며, 최

대용접전류는 2장에서 언급한 바와 같이 270mm 폭의 판재 용접시 70kA로 설정하였다.

접합공정 모니터링 기법으로는 동저항 측정법 및 외판 표면 온도 측정법을 적용하여 가압량, 용접속도, 통전위치의 변화에 따른 공정특성을 살펴보았다. 용접전압 및 전류는 1초당 1200회, 온도는 1초당 8회의 빈도로 측정되었다.

3.1 동저항 측정

동저항 측정법은 저항 용접 공정의 모니터링에 널리 이용되는 모니터링 기법으로, 본 연구에서도 우선적으로 고려되었다. 판재의 이송속도, 통전위치, 판재에의 가압량을 변화시키며 동저항을 모니터링 하였다.

가압량 변화에 따라서는 Fig. 2와 같이 전압의 변화가 두드러지며 동저항이 비교적 크게 변화하는 것을 관찰하였는데, 가압량에 대한 민감성은 프로젝션 용접에서 일반적으로 관찰되는 양상이다⁹⁾.

한편 이송속도와 통전위치에 따른 동저항의 변화는 두드러지지 않았다. 이는 내부 구조재의 패턴 간격이 2.4mm로 조밀한데 비하여 전극 직경은 200mm로 크기 때문에 용접중 항상 2~3개 패턴 간격에 걸쳐 통전되기 때문으로 생각된다. 패턴 간격이 더욱 넓은 내부 구조재를 사용하는 경우에는 이송속도 및 통전위치에 따른 동저항도 유의미한 변화를 보일 수 있을 것이다.

Fig. 3은 DP590을 외판재로 하여 전극 간격이 2.95mm가 되도록 축간거리를 고정하여 실험하였을 때의 동저항을 나타낸 것이다. 이 실험에서는 의도적으로 과다 입열 조건을 설정하여 최적 통전시간인 2사이클이 아니라 5사이클까지 통전하였으며, 용접 개시 2s 후에 외판이 용융되었다. 외판 용융 전후의 동저항 파형을 비교하면 동저항의 뚜렷한 상승이 관찰된다. 용융된 외

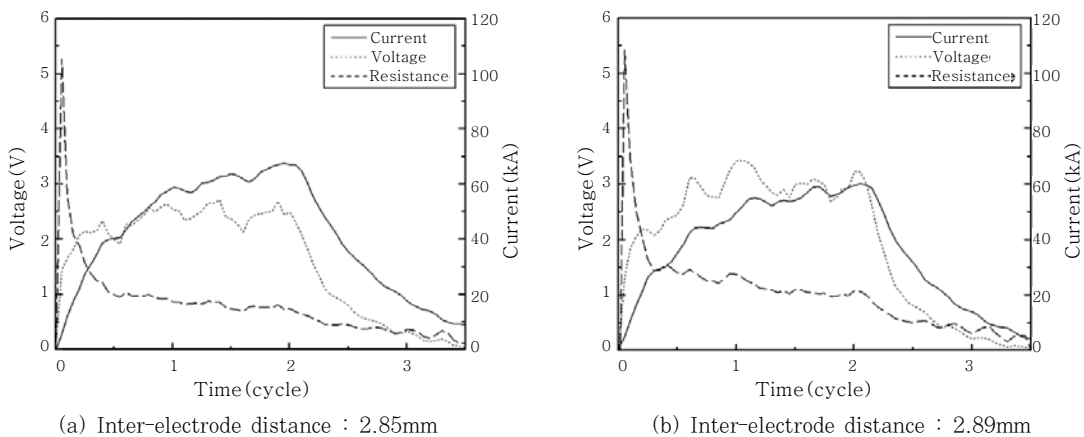


Fig. 2 Comparison of dynamic resistance behavior

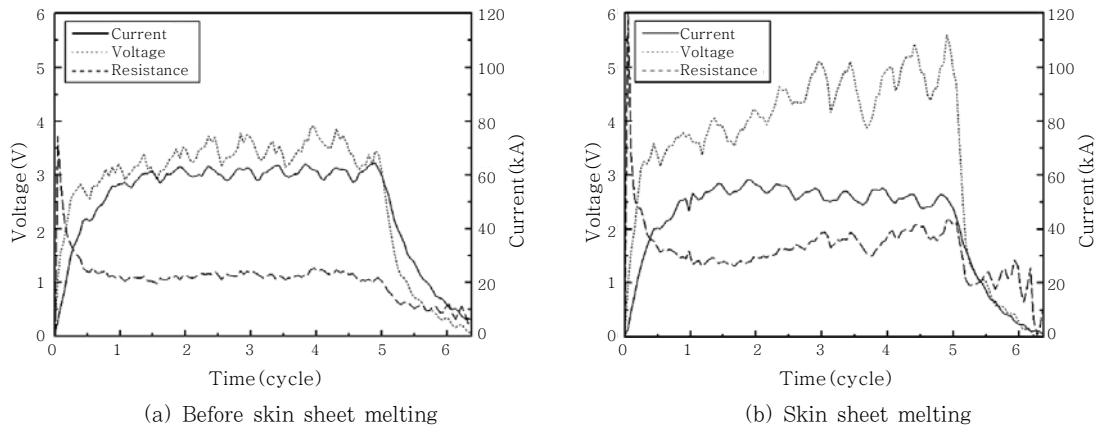


Fig. 3 Comparison of dynamic resistance behavior

판은 전극의 손상을 야기하여 용접장치를 가동중단에 이르게 하므로 가압에 따른 동저항 변화는 주의 깊게 모니터링 되어야 한다.

이와 같은 결과는 적절한 판재의 두께 및 이를 얻기 위한 가압량을 선정하고, 공정중 발생할 수 있는 전극 손상을 방지하기 위한 모니터링 기법으로 동저항 측정법이 적절함을 보여준다.

그러나 동저항 측정법은 넓은 폭에 존재하는 다수의 용접점에 대하여 평균화된 측정치를 주므로 판재 특정 지점의 용접 품질에 대한 정보를 획득하기에는 한계가 있다. 따라서 국부적인 용접 품질을 예측하기 위해서는 적절한 모니터링 기법이 강구되어야 한다.

3.2 외판 표면 온도 측정

비파괴적 모니터링 기법인 엑스선 투시법은 아크 용접부의 결합인 기공(porosity) 형성 여부를 판별하는데 효과적이거나, 내부에 빈 공간이 형성되는 금속 샌드위치 판재에의 적용 가능성은 미지수이다. 발포 금속 내부재를 갖는 금속 샌드위치 판재 제작 공정 모니터링에 엑스선 투시법을 이용한 예²⁾가 있으나 접합 품질 예측보다 발포 금속의 팽창 양상 관찰에 치중하였다.

초음파 탐사를 이용하여 저항용접부의 품질을 판별하는 연구들^{10,11)}이 있으나 대부분 단일 점용접부를 대상으로 하고 있으며, 용접 종료 후의 품질 검사에 치중하고 있다.

본 연구의 금속 샌드위치 판재에는 작은 용접점이 고 밀도로 분포되어 있으며, 펄스 형태의 대전류를 통전하여 연속 용접을 실시하므로 강한 전자기력에 의해 진동과 소음이 크게 발생하므로 용접 공정 중 초음파 탐사법을 모니터링 기법으로 적용하기 어려울 것으로 예상

하였다.

용접부나 전극 표면 온도를 측정하여 저항용접의 공정분석에 사용한 연구들^{12,13)} 또한 보고되었으나 동저항 측정법, 전극 변위 측정법 등 현재 널리 이용되고 있는 모니터링 기법에 비하여 효용성이 적은 것으로 여겨지고 있다. 이는 실시간의 정확한 온도 측정을 위한 열전대 등 접촉식 센서를 전극 팁에 심는 것에 제약이 있고, 적외선 센서 등으로 비접촉식 측정을 하는 경우 용접부 외곽의 온도를 얻게 되기에 정확한 측정이 어렵기 때문이다.

또한 용접 종료 후 측정할 시 모재의 두께가 두꺼울수록, 늦게 측정할수록 열전도에 의해 왜곡된 결과를 얻는다는 점도 단점으로 들 수 있다.

그러나 본 연구에서는 0.5mm의 박판을 외판재로 사용하므로 열전도에 의한 온도 재분포 효과가 비교적 적다. 또한 작은 용접점이 조밀하게 분포하므로 판재의 온도가 비교적 고르며, 판재가 연속 용접되어 배출되므로 고정된 위치에 온도 센서를 부착하여 모니터링하기에 용이한 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 적외선 온도 센서를 이용하여 용접중인 판재의 특정 지점에서 외판의 온도를 측정하는 방법을 채택하였다. 이와 유사한 방식으로는 최근 폴리머 기반 복합체의 저항 용접 공정을 모니터링한 연구가 G. F. Nino 등에 의해 보고된 바 있다¹⁴⁾.

Fig. 4에 적외선 온도 센서의 장착 모습을 나타내었다. 이와 같은 센서 배치에 따라 외판 표면 온도는 통진 지점에서 55mm 떨어진 위치에서 측정되며, 이는 12mm/s의 용접속도에 대하여 4.58s의 측정 지연에 해당한다.

Fig. 5에 DP590 외판재를 사용한 금속 샌드위치 판재의 외판 온도에 따라 용접부를 박리한 양상을 나타내었다. 온도가 300°C 이하일 때는 내부 구조재와 외판

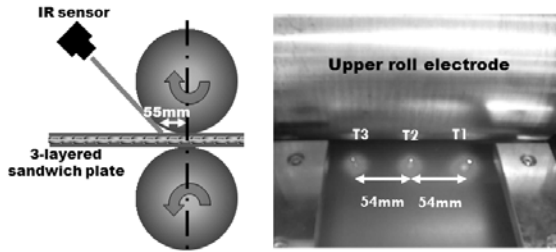


Fig. 4 Experimental setup for temperature measurement

의 계면이 깨끗이 분리되는 계면파단이 나타나지만 350℃ 및 460℃의 온도에서는 외판에 내부 구조재의 일부가 붙은 채로 파단되는 모재 파단의 양상이 나타난다. 온도가 더욱 상승한 부위에서는 날림으로 인해 용융 금속의 소실이 점차 심해지고 있음이 관찰된다.

이로써 외판 표면 온도 모니터링이 판재 특정 부분에서의 용접 품질을 예측하는 데에 적용할 수 있는 기법임을 확인하였다. 용접 조건이나 온도 측정지점 등이 변하는 경우 적정 용접조건에 해당하는 온도 범위를 다시 설정함으로써 여전히 유효한 기법으로 활용할 수 있다.

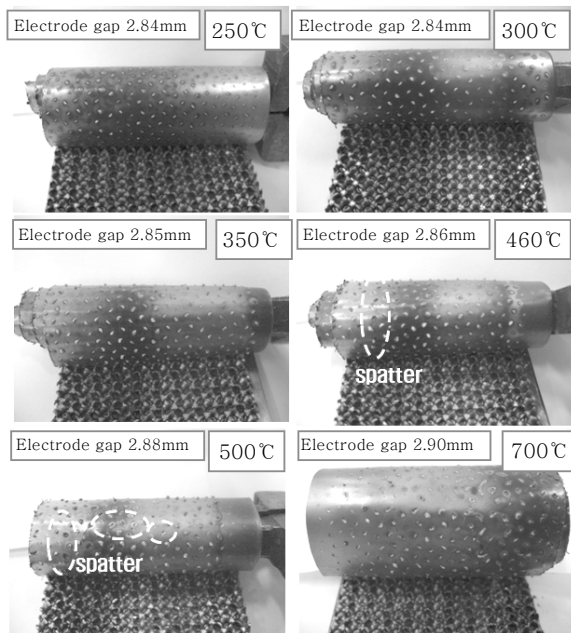


Fig. 5 T-peeled weldments according to skin sheet temperature (skin sheet material : DP590)

4. 모니터링 결과 및 고찰

동저항 모니터링과 외판 온도 모니터링 결과는 Fig. 6과 같이 유사한 거동을 나타내었다. 가압 방식은 축간 거리 고정 방식을 사용하였는데, 시간에 따라 큰 폭으로 변하는 결과를 얻었다. 이와 같은 변화는 축간거리를 고정하더라도 가압력, 다시 말해 전극 간격은 변화하고 있음을 의미하는 것이다. 높은 가압력은 낮은 접촉저항 및 발열 부족을 야기하며, 가압력 부족은 접촉저항 상승과 발열과다를 유발함은 앞서 2장에서 논의한 바와 같다.

이 변화에서 두 가지의 거시적인 경향을 찾아볼 수 있는데, 첫째는 주기적인 증감이며 둘째는 전반적인 하강이다. 주기적인 증감은 약 52s를 주기로 나타나는데, 직경 200mm인 롤전극이 12mm/s의 선속도로 1회전하는데 소요되는 시간과 일치한다. 이는 용접 장치에 장착된 상/하 롤전극이 약 0.01mm의 편심을 가지고 있어 축간거리 고정시 최대 0.04mm 가량의 전극간격 변화가 발생하기 때문으로 파악되었다. 전반적인 하강 양상은 전극 간격이 지속적으로 좁아져 가압력이 상승

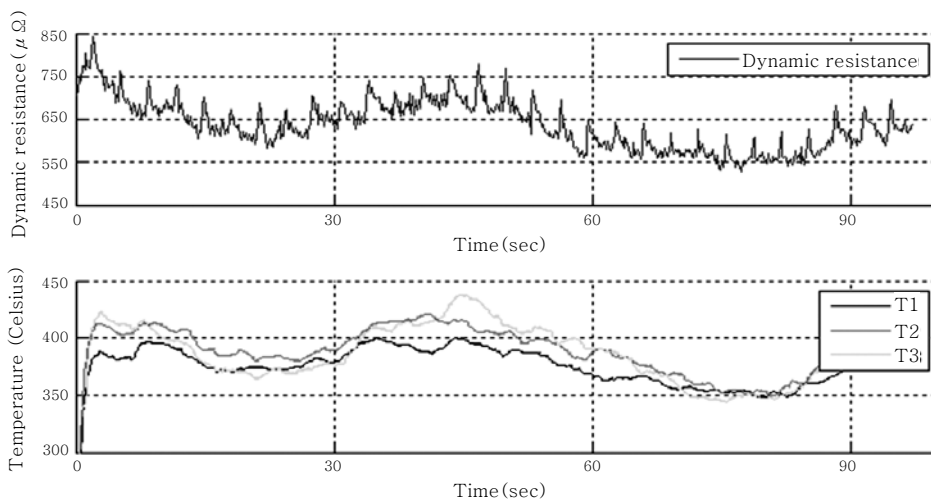


Fig. 6 Similar tendency of dynamic resistance and skin sheet temperature

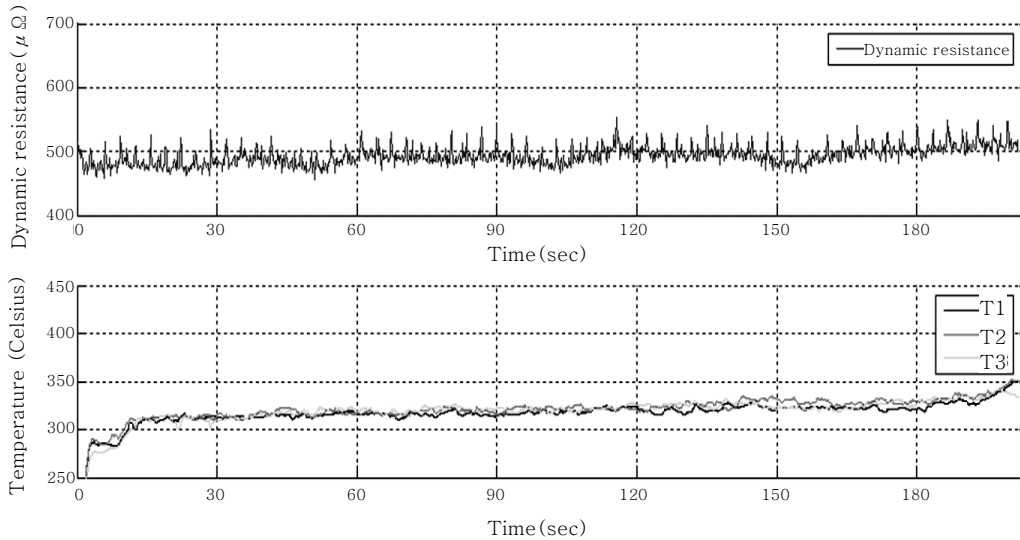


Fig. 7 Significantly improved consistency of monitoring parameters by feed-back control of pressure

함을 의미하며, 이는 용접중에 전극이 점진적으로 열팽창하기 때문에 조사되었다.

이와 같은 바람직하지 않은 현상들은 용접중에 일정한 가압력을 유지함으로써 해결할 수 있다. 물전극 회전축 양쪽에 로드셀을 장착하여 하중을 측정하고, 이를 제어변수로 이용하여 전극을 상하로 이동하는 피드백 제어 시스템을 구축한 결과 Fig. 7과 같이 크게 개선된 결과를 얻었다.

한편 Fig. 6 및 Fig. 7의 모니터링 결과를 보다 면밀히 살펴보면 동저항에서 3.2s를 주기로 하는 피크가 관찰된다. 이는 12mm/s의 용접속도에서 38.4mm의 거리에 해당한다. 반면 온도 측정 결과는 확연한 차이를 보이지 않는데, 온도 센서 자체의 시간 분해능 부족 및 측정 지연시간 동안의 열전도 때문으로 생각된다.

동저항에서 나타나는 피크는 전단형 딴플 내부 구조재의 구조적 문제 때문인데, 내부 구조재를 프레스 성형할 때 Fig. 8(a)와 같이 작은 금형을 엇갈려 배열한 후 순차적으로 가장자리 일부를 겹치며 성형¹⁵⁾하기 때문이다. 프레스 금형의 겹침이 일어나는 가장자리 부분은 금형에 의해 2회 눌러지게 되어 정상적인 부위보다 높이가 낮아진다. 따라서 용접중 물전극이 이 부위를

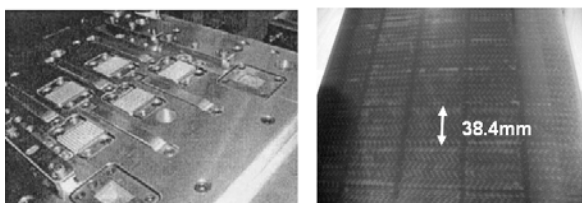
지나갈 때에는 높은 저항을 보이게 되어 불량한 용접점이 형성되며, Fig. 8(b)와 같이 용접 판재의 외관에서도 뚜렷이 나타난다. 이를 응용하면 동저항 측정을 내부재의 가공 불량이나 프레스 성형기의 불균일한 마모 등의 검출에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

저항 용접을 적용한 연속 용접장치를 이용하여 전단형 딴플 형상의 내부 구조재를 가진 금속 샌드위치 판재를 생산하였으며, 동저항 측정 및 외관 온도 측정을 통하여 판재의 용접 양상을 예측할 수 있음을 확인하였다.

동저항 측정법의 경우 실시간으로 모니터링이 가능하고 판재와 전극간 접촉 저항의 지나친 상승으로 인한 전극의 손상을 막는 데에는 유용하게 사용될 수 있지만, 판재의 폭방향 전체의 평균값만을 나타내는 한계가 있다. 이에 판재 특정부분에서의 용접 품질을 예측하기 위해 외관 표면 온도 측정법을 새로운 모니터링 기법으로 도입하였고, 이를 통해 전극의 편심이나 열팽창 등과 같은 전극의 불량 상태를 검출하는 데에도 활용될 수 있음을 확인하였다.

그리고 판재 전체 두께 3mm중 전극간 간격의 0.01mm 정도의 미세한 변화도 용접 품질에 큰 영향을 미치는데, 이러한 차이는 편심이나 편마모 등과 같은 전극의 불량 상태뿐만 아니라 용접중 전극의 열팽창 등과 같은 요인에도 아주 민감하게 반응하게 되어 균일한 품질의 판재를 생산하는데 큰 어려움이 있다. 따라서 전극의 축간 거리를 제어하는 방식보다, 적절한 전극 가압력을 일정하게 피드백 제어함으로써 균일한 품질의 판재 생산이 가능하였다.



(a) Segmented mold (b) Welded plate surface

Fig. 8 Effect of double press by mold edge

후 기

본 연구는 지식경제부 중장기산업기술개발사업 및 BK21 사업의 지원으로 POSCO 주관하에 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F. Simančík, J. Kováčik and N. Mináriková : Bending Properties of Foamed Aluminum Panels And Sandwiches, MRS Symposium Proceedings, **521** (1998), 91-96
2. John Banhart, Heike Stanzick, Lukas Helfen, Tilo Baumbach and Katrin Nijhof : Real-time X-ray Investigation of Aluminum Foam Sandwich Production, Adv. Eng. Mat., **3-6**(2001), 407-411
3. M. Maurer, L. Zhao and E. Lugscheider : Surface Refinement of Metal Foams, Adv. Eng. Mat., **4-10** (2002), 791-797
4. V. S. Deshpande and N. A. Fleck : Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3-point Bending, Int. J. Solids Struct., **38-36**(2001), 6275-6305
5. J. Wang, A. G. Evans, K. Dharmasena and H. N. G. Wadley : On the Performance of Truss Panels with Kagome Cores, Int. J. Solids Struct., **40-25**(2003), 6981-6988
6. H. N. G. Wadley : Cellular metals manufacturing, Adv. Eng. Mat., **4-10**(2002), 726-733
7. S. J. Na, J. S. Ahn and J. H. Kim : A Study on 3-layer Roll Projection Welding of Large Area, IIW Document III-1491-08, 2008
8. D. Y. Seong, C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Yang, S. H. Lee and D. G. Ahn : Fabrication of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure and Static Bending Test, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, **30-6**(2006), 653-661 (in Korean)
9. S. M. Cho : Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results, KWJS journal, **15-2**(1997), 1-10(in Korean)
10. O. Martin, M. Lopez and F. Martin : Artificial Neural Networks for Quality Control by Ultrasonic Testing in Resistance Spot Welding, J. Mat. Pro. Tec., **183**(2007), 226-233
11. Z. Chen, Y. Shi, B. Jiao and H. Zhao : Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Spot Welds for Zinc-coated High Strength Steel Sheet Based on Wavelet Packet Analysis, J. Mat. Pro. Tec., **209** (2009), 2329-2337
12. E. W. Kim and T. W. Eager : Measurement of Transient Temperature Response during Resistance Spot Welding, Welding Journal, **68-8**(1989), 303s-312s
13. J.D. Cullen, N. Athi, M. Al-Jader, P. Johnson, A.I. Al-Shamma'a, A. Shaw and A.M.A. El-Rasheed : Multisensor Fusion for On Line Monitoring of the Quality of Spot Welding in Automotive Industry, Measurement, **41-4**(2008), 412-423
14. G. F. Nino, T.J. Ahmed, H. E. N. Bersee and A. Beukers : Thermal NDI of Resistance Welded Composite Structures, Composites: Part B, **40-3** (2009), 237-248
15. B. H. Kim et al. : 대면적 미세패턴의 성형기술 개발, 지식경제부, (2008) (in Korean)