

알루미늄합금의 저항 점용접에 관한 연구(II)

(알루미늄합금-아연도금강판 이중재료의 용접)

A Study on the Resistance Spot Welding of Aluminum-Alloy (II)

최용범*, 박세민**, 장희석**, 배경민***, 신현일***

*명지대학교 기계공학과 대학원 **명지대학교 기계공학과 ***현대자동차 차체개발부

1. 서론

알루미늄합금의 저항 점용접과 관련한 연구는 주로 이의 점용접성을 평가하고, 양호한 용접질을 얻을 수 있는 welding schedule을 설정하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔으나[1-11] 이와 관련된 용접품질 평가나 접합공정 등에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 또한 동종계열에 첨가 원소나 열처리등을 달리한 알루미늄 합금간의 저항 점용접에 관한 연구가 일부에서 시도되고 있으나 용융온도와 열물리적 특성이 현저하게 다른 알루미늄합금과 아연도금 강판사이의 이중재료간의 점용접에 관한 연구는 아직 국내에 보고된 바 없다.

본 연구는 알루미늄합금강판을 자동차 차체용으로 사용하기 위하여 부분적으로 고려되고 있는 냉간압연강판 등과의 이중재료간 용접을 실현하고 용접성을 평가하며, 또한 비파괴검사(NDT)의 관점에서 용접질을 추정하거나 균일한 용접질 보장을 위한 제어기등을 설계한 연구로 발전시키기 위한 기초연구이다.

2. 연구 내용

본 연구에서는 현재 개발되어있는 차량구조용 알루미늄합금재료와 현재 차량구조용으로써 사용되어지고 있는 아연도금강판을 이용하여 이들 이중재료에 대한 저항 점용접의 welding schedule을 설정하기 위한 실험을 수행하였다. 알루미늄합금에 비하여 높은 용융온도와 낮은 열전도율을 가지는 아연도금강판쪽의 전극의 직경을 작게하여 이곳에 전류가 통과하는 단면적을 좁게하여 전류의 밀집도를 증가시켰으며, 알루미늄합금과 아연도금합금의 고른 용융을 유도할 수 있는 용접조건을 찾기 위하여 용접부의 금속 조직검사를 수행하였다.

3. 실험장치 및 방법

용접

본 연구에서는 용량 150kVA인 공기압 작동식 저항 점용접기를 사용하여 실험하였다. 이 용접기에는 공기압 조절기가 부착되어 전극가압력을 조절할 수 있고, 펄도로 부착된 timer로는 가압시간(squeeze time), 용접시간(weld cycle), 유지시간(hold time) 및 용접전류를 각각 조절할 수 있다. 전극은 mild steel, low-alloy steel, stainless,

low-conductivity brass 및 Nickel 합금등의 저항 점용접에 적합한 RWMA class II에 해당하는 재질인 Cu-Cr 봉을 이중재료의 용접에 적합한 flat한형태와 tapered-flat한 truncated cone형태 및 dome형으로 가공한 형태의 전극을 사용하였다. 그림 1에는 저항 점용접 시스템의 간략도와 세 종류의 전극의 형상이 도시되어 있다.

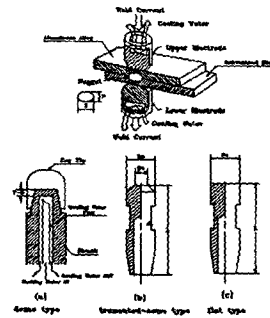


Fig. 1 Schematic Diagram of Resistance Spot Welding Process and Geometry of Electrodes

동저항 파형의 측정

용융부 추정을 위한 인공신경회로망의 입력신호인 동저항 파형을 샘플링하기 위하여 Miyachi사의 MM-326B형의 weld checker를 사용하였다. MM-326B weld checker는 용접시 용접전류와 전압을 반 사이클(half-cycle)단위로 측정하여 이들의 RMS값을 용접이 끝난 후 출력해 준다. 그 외에도 SCR의 통전각을 half-cycle별로 표시해 주고 용접의 진행상태는 용접전류가 통전하는동안 발생하는 trigger 신호로 나타낼 수 있도록 설계되어있다. 동저항 파형은 여기서 측정되는 half-cycle마다의 용접 전류와 전압을 이용하여 오옴(Ohm)의 법칙($V=IR$)을 사용하여 구한다.

Electrode Movement의 측정

저항점용접시 용융부의 열팽창은 용접시스템의 열물리적 현상(thermo-physical phenomena)을 잘 반영해주는 일 반적으로 많이 사용되는 파라미터이며, 용융부 추정을 위한 인공신경회로망의 입력신호로써도 유용한 자료이다. 전극 분리신호의 파형을 샘플링하기 위하여 현재 전동해석등을 위하여 상품화 되어있는 비접촉식 미소변위 측정장비중

eddy current 효과를 이용한 Ono-Sokki사의 gap sensor를 사용하여 측정한다.

그림 2에는 본 연구를 위하여 구성한 용접공정변수들의 모니터링 시스템에 대한 간략도가 도시되어 있다.

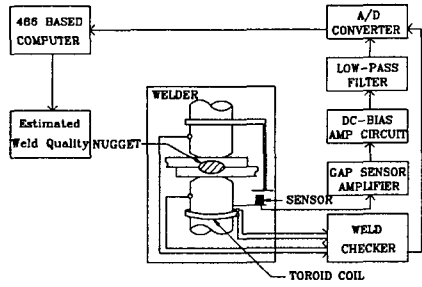


Fig. 2 Schematic Diagram of Monitoring System for Resistance Spot Welding Process

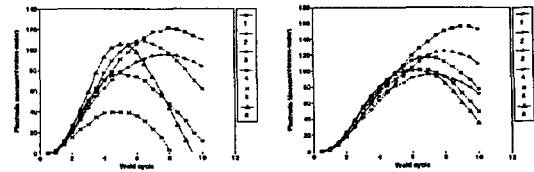
용접부 관찰

용접실험이 끝난 시편들은 각각의 조건 및 횟수에 따라 일련번호를 부여하여 Buehler사의 SIMPLET 2 cutter를 이용하여 용접부 정중앙을 절단한 다음 SIMPLET 2 mounting press로 mounting하고 동사의 Grinder/Polisher를 이용하여 polishing후 etching 작업을 통해 나타난 절단부의 조직을 SONY사의 XC-711 color CCD camera로 근접촬영하였다. 촬영된 image 데이터는 Data Translation사의 DT-2871 이미지 프로세싱 시스템을 사용하여 컴퓨터에 저장하고 용융부 크기를 화상 처리용 소프트웨어인 Global Lab의 image enhancement & convolution등의 기능을 이용하여 용융부를 판독이 용이한 형상으로 처리한 후 용접부의 금속조직을 관찰하였다[16]. 또한 용접부의 SEM 촬영과 EDAX분석도 병행하여 용접부의 각 성분원소들의 화학적 조성분포도 검사하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구 이전에 수행된 아연도금강판(SGACC) 및 자동차용 차체 구조물로 사용 가능한 일본 Kobe Steel의 알루미늄 합금강판(KS6383-T4, KS5032-T4)을 사용한 기초연구에서 아연도금강판과 비교할 수 있는 알루미늄 합금강판의 몇가지 중요한 용접특성을 알 수 있었다.

먼저 전극분리신호의 경우 기존의 냉간압연강판 또는 아연도금강판에서 나타났던 충분한 열팽창은 알루미늄합금의 경우 재료의 연성에 의하여 초기 열입력에 의하여 용융된 접촉면이 연화된 조직들 사이로 쉽게 합입이 일어나며 아연도금강판보다 더욱 깊이 합입이 일어난다.

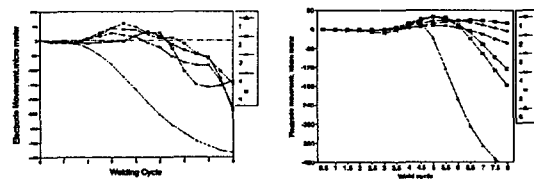


	1	2	3	4	5	6
Force, kgf	250	300	300	350	400	350
current, kA	8.5	8.5	9	9	9.5	10

(a) SGACC(Truncated)

	1	2	3	4	5	6
Force, kgf	200	250	350	300	350	400
current, kA	8	8.5	8.5	9	9	9

(b) SGACC(dome)



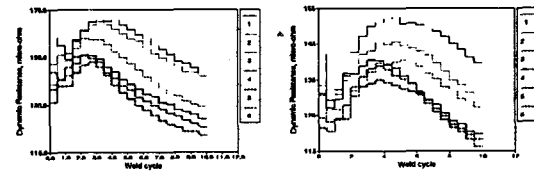
	1	2	3	4	5
Current, kA	24	26	28	30	32

(c) KS5032-T4(dome)
force=260kgf

	1	2	3	4	5	6
Current, kA	22	24	26	30	32	34

(d) KS6383-T4(dome)
force=250kgf

Fig. 3 Electrode Movement

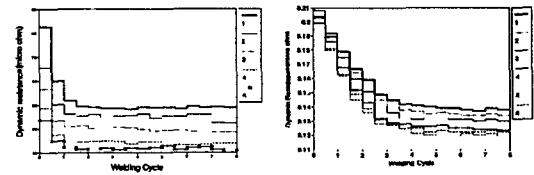


	1	2	3	4	5	6
Force, kgf	250	300	300	350	400	350
current, kA	8.5	8.5	9	9	9.5	10

(a) SGACC(Truncated)

	1	2	3	4	5	6
Force, kgf	200	250	350	300	350	400
current, kA	8	8.5	8.5	9	9	9

(b) SGACC(dome)



	1	2	3	4	5
Current, kA	24	26	28	30	32

(c) KS5032-T4(dome)

	1	2	3	4	5	6
Current, kA	22	24	26	30	32	34

(d) KS6383-T4(dome)

Fig. 4 Dynamic Resistance

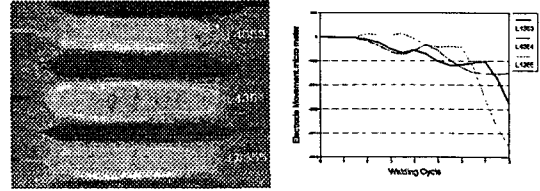
그림 3(a)와 그림 3(b)는 아연도금강판인 경우 truncated cone type인 경우와 dome type인 경우의 전극 분리신호를 나타내며, 그림 4(a)와 그림 4(b)는 전극의 형상에 따른 동저항을 나타낸다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 dome type 전극을 사용한 경우 KS5032-T4와 KS6383-T4를 사용한 경우의 전극분리신호이며 KS6383-T4에 비하여 KS5032-T4의 파형이 더욱 불안정하며 이러한 용접의 시편의 정중앙을 절취하여 관찰한 결과 그림 5처럼 용융부의 중앙부근에 심한 균열 및 기공이 발생하였다. 한편 동저항

신호도 냉간압연강판 또는 아연도금강판에서 나타났던 특유의 resistance drop(저항이 어느 정도 상승한 후 최종적으로 강하하는 현상)이 보이지 않고 처음부터 저항이 감소하여 용융이 일어나 전극속으로의 함입이 일어나면서 동저항은 그림 4(c)와 그림 4(d)처럼 용접후반부에 일정하게 되는 현상을 나타낸다. 따라서 KS5032-T4보다 KS6383-T4가 더욱 용접성이 뛰어난 것으로 생각된다.

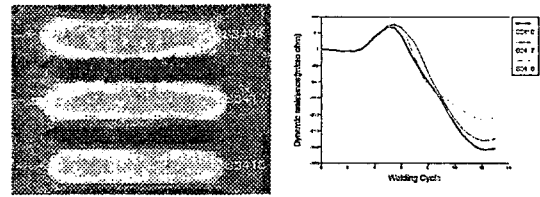


Fig. 5 Cross Section of Weldment (KS5032-T4)

그림 6과 같이 일반적인 알루미늄 합금강판의 저항 점용접시 전류가 통전되어 접촉면에서 용융이 일어난 용융부 주위의 팽창량보다 통전이 끝난과 동시에 냉각수에 의한 냉각으로 용융부는 수축하게되며 알루미늄합금의 특성상 수축율이 더욱 크게되며 용융부의 내부에 기공 및 균열의 용접결함을 나타낸다. 이러한 균열 및 기공의 발생을 억제하기 위하여 용접후기에 전극의 가압력을 높이는 2단계압이 필요하게 된다. 하지만 압축성이 풍부한 공기압 실린더를 사용하는 공기압 정치식 저항 점용접기는 정상적인 압력의 증가를 요하는 시간이 용접후기의 짧은 시간동안 실현되기 어렵다. 이러한 2단계압은 현재 산업현장에서 사용하고 있는 용접공정에 직접 적용하기에는 경제성의 문제가 있다. 따라서 이러한 균열 및 기공의 방지를 위한 2단계압의 효과와 상용하게 용접결함을 방지할 수 있도록 용접후기에 전류를 조절함으로써 용접결함을 방지할 수 있다. 그림 6(a)에서는 통전이 끝난후 곧바로 열입력을 제거한 경우 용융부의 중앙부근에 균열 및 기공이 관찰되며 이러한 용접결함은 용접도중 나타나는 전극분리신호에 반영되어 그림 6(b)에서처럼 나타난다. 그림 6(c)는 이러한 용접결함을 개선하기 위하여 용접 열입력을 단계적으로 변화시킬 수 있을 때의 경우이다. 즉, 용접 전반기에 실제전류의 30%에 해당하는 열입력을 가한 후 6Cycle동안 실제 용접전류를, 후기에 55%의 전류를 각각 5Cycle동안 가하는 방법으로 용접한 경우의 용융부의 단면이며, 균열 및 기공이 관찰되지 않는다. 이러한 상황을 잘 반영한 전극분리신호의 파형이 그림 6(d)이다. 이러한 특징들을 자세히 고찰하면 알루미늄 합금강판은 지금까지 주로 사용해 왔던 주된 재질인 냉간압연강판이나 아연도금강판과는 다른 물리적 특성을 가지며, 이러한 차이점은 저항 점용접 공정의 모니터링 신호인 전극분리신호 또는 동저항 신호에 반영된다. 따라서 이들 모니터링 신호의 체계적인 고찰은 알루미늄 합금강판의 저항 점용접 특성을 파악하기 위한 기초 자료가 된다.



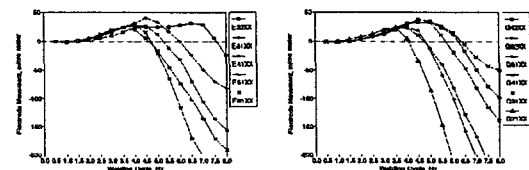
(a) Cross Section of Weldment (b) Electrode Movement (Electrode force=290kgf, Welding Current=26kA, Cycle=8)



(c) Cross Section of Weldment (d) Electrode Movement (Electrode force=250kgf, Cycle=T1:2, T2:6, T3:5, Welding Current=T1:7, 8kA, T2:26kA, T3:14, 3kA)

Fig. 6 Cross Section and Electrode Movement

한편 알루미늄합금-아연도금강판 이종재료의 저항 점용접 실험에서도 알루미늄 합금강판의 저항 점용접시와 유사한 전극분리신호의 파형을 보였다. 그림 7(a)는 알루미늄합금측은 전극의 직경을 8mm로 아연도금강판측은 6mm로, 그림 7(b)는 알루미늄합금측은 전극의 직경을 15mm로 아연도금강판측은 6mm로 용접한 알루미늄합금과 아연도금강판의 이종재료용접시 전극분리신호이다. 그러나 용접부 단면을 절단하고 mounting, polishing, etching한 후 영상화한 그림 8에서 이종재료 접합의 경우 용융점이 높고 열전도도가 상대적으로 작은 아연도금강판측으로는 용융부가 형성되지 않은 것을 볼 수 있다.



(a) Upper electrode(SGACC):6mm Lower electrode(KS6383-T4):8mm (b) Upper electrode(SGACC):6mm Lower electrode(KS6383-T4):15mm Fig. 7 Electrode Movement (KS6383-T4 v.s. SGACC)

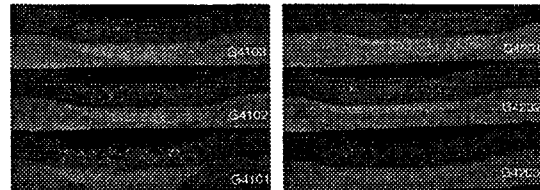
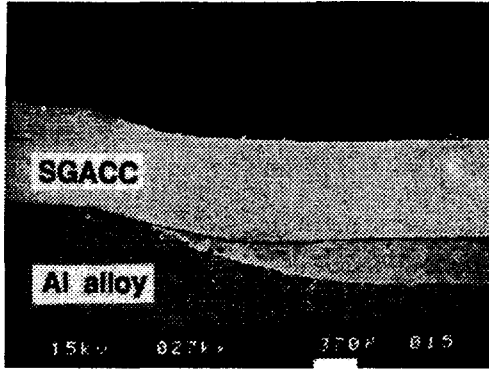
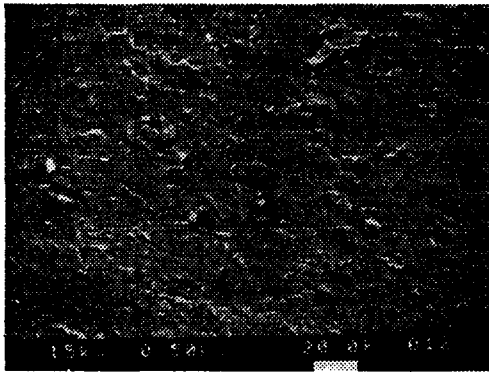


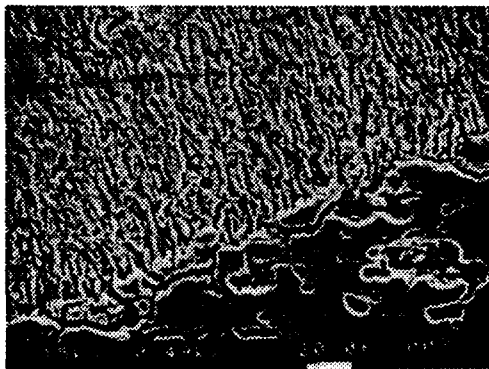
Fig. 8 Cross Section of Weldment (KS6383-T4 v.s. SGACC)



(a) Cross Section of Weldment, 27X



(b) Metallography of SGACC Base Metal, 500X



(c) Interface of Nugget(above) and Base metal(below) in Al-Alloy, 500X

Fig.9 Photomicrographs of Al-Alloy & SGACC Spot Weldment

Fig.9(a)는 알루미늄합금과 아연도금강판의 이종재료용접의 단면사진이다. 알루미늄합금측의 전극Tip직경이 넓기 때문에 재료표면의 함입은 거의 나타나지 않고 냉각수에 의한 열의 방출이 많아 알루미늄합금의 용융부와 모재사이의 경계가 뚜렷하다. 아연도금강판측의 전극Tip직경은 작

기 때문에 전극가압력에 의한 함입이 일어났다. Fig.9(b)는 용접시 열영향을 거의 받지않은 아연도금강판의 Base Metal을 나타낸다. Fig.9(c)에서는 알루미늄합금의 용융부와 Base Metal의 경계층이 뚜렷하게 나타나며 냉각면적의 증가에 따른 급속한 냉각으로 HAZ가 거의 존재하지 않는 형태를 나타낸다.

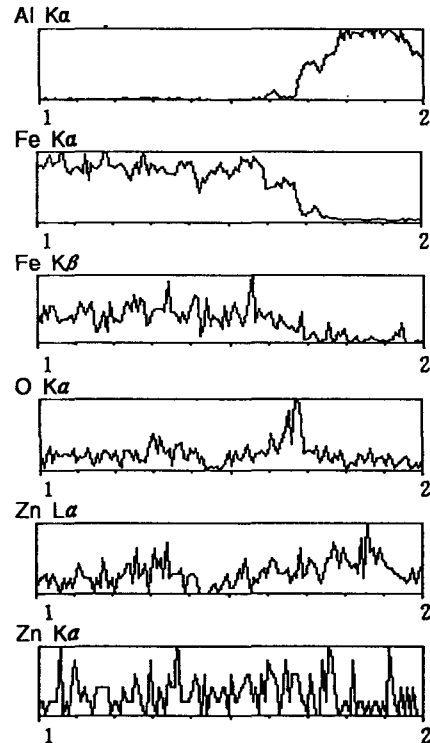
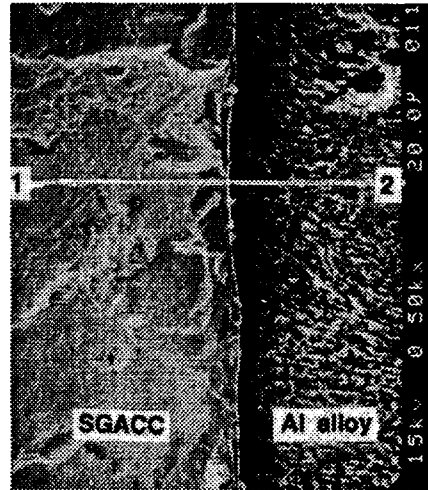


Fig.10 EDAX spectrums across the interface between SGACC(left) and Al alloy(right), 500X.

Fig.10의 사진에서 알루미늄합금의 접촉면은 용융이 일어난 반면 아연도금강판쪽은 용융이 일어나지 않았으며 알루미늄합금의 용융에 의하여 경계면은 Bonding(접합)의 형태를 나타낸다. 알루미늄합금과 아연도금강판의 경계면의 화학조성변화를 분석하기 위하여 1에서 2까지의 단면을 EDAX로 Line Scan하여 구해진 스펙트럼은 각 원소들의 변화를 나타낸다. 1 위치에서는 알루미늄은 거의 나타나지 않으나 경계부근에 도달할수록 알루미늄의 함량이 급격히 증가하며, 철의 함량은 많이 나타나는 반면 경계부근에서는 약간 줄어들며 2점에 가까워지면서 거의 나타나지 않게 된다. 이러한 경계부근에서 알루미늄과 철의 확산이 일어나며 산소가 다량으로 분포한다.

5. 향후연구과제

본 연구에서는 알루미늄합금의 저항점 용접성을 고찰하기 위하여 전류와 전극가압력을 광범위한 조건으로 변화시켜 가며 실험하였다. 저항점 용접도중 생성되는 용융부의 형성 과정을 잘 나타내주는 용접공정변수인 동저항파형과 전극분리신호를 측정함으로써 용융부의 성장과정을 정성적(Qualitatively)으로 규명하였다.

이종재료간의 저항점용접은 용융점이 높은 재료쪽의 전류밀도를 높이기 위하여 전극Tip의 크기를 달리하여 실험하였으며 아연도금강판은 용융이 일어나지 않은 반면 알루미늄합금의 용융에 의하여 Bonding(접합)이 관찰되었다. 알루미늄합금쪽의 전극을 크게하면 표면에 함입(Indentation)이 거의 일어나지 않아 피용접물의 외관상 문제를 해결할 수 있었다.

알루미늄합금의 용접에서 발생하는 균열 및 기공의 방지를 위하여 용융부의 성장과정을 잘 반영하여 주는 동저항파형변화와 전극분리신호를 측정하여, 이를 근거로 후열처리를 위한 전류를 조절하고, 용접후반부에 전극의 이단가압을 포함한 Welding Schedule의 개발이 필요하다. 본 연구의 결과는 알루미늄합금용접에 적합한 Welding Schedule의 개발과 자동차 생산공정에서 아연도금강판과 알루미늄합금간의 이종재료의 용접성에 관한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

<참고문헌>

1. Metal Handbook(미국금속학회)
2. Welding Handbook(미국용접학회)
3. Resistance Welding Manual(RWMA)
4. GEDEON S. A., SORENSEN C.D., ULRISH K.T., and EAGAR T.W.,1987, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", Welding Journal, Dec., pp.378-385.
5. OMUSU-OFORI S.P. and WU S.M., 1983, "Signature

Analysis of Contact Voltage of Resistance Welds", Welding Journal, July, pp.185s-189s.

6. GOULD J.E.,1987, "An Examination of Nugget Development During Spot Welding Using Both Experimental and Analytical Technique", Welding Journal, January, pp.1s-10s.
7. WOOD R.T., BAUER L.W., BEDARD J.F., BERNSTEIN B.M., CZECHOWSKI J., D'ANDREA M.M., and HOGLE R.A.,1985, "A Closed Loop Control System for Three-Phase Resistance Spot Welding", Welding Journal, Dec., pp.26-30.
8. H.S. Chang, CHO H.S., 1990, "An Iterative Learning Control System for Resistance Spot Welding Processes", ASME Automation of Manufacturing Processes, DSC-Vol.22, pp.129-135.
9. CHANG H.S., CHO Y.J., CHOI S.G., and CHO H.S., 1986, "A Proportional-Integral Controller Compensating Spot Weld Quality Variation due to Electrode Wear", Modeling, Sensing, and Control of Manufacturing Process, PED - Vol.23/DSC-Vol.4, American Society of Mechanical Engineers, Book No.H00370, New York, pp.83-93.
10. CHANG H.S. and CHO H.S., 1987, "Estimation and Control of the Weld Nugget Size in Resistance Spot Welding Processes", Sensors for Manufacturing, PED-Vol.26, American Society of Mechanical Engineers, Book No. G00405, New York, pp.215-227.
11. CHANG H.S., CHO Y.J., CHOI S.G. and CHO H.S., 1989, "A Proportional-Integral Controller for Resistance Spot Welding using Nugget Expansion", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.111, No.2, June, pp.332-336.
12. Lim T.G., Cho H.S., and Chang H.S., 1991, "Estimation of Nugget Size in Resistance Spot Welding Using a Neural Networks", American Welding Society, 1991, Annual Meeting, Detroit.
13. 이정우, 박종우, 최용범, 장희석, 1992, "아연도금강판의 저항 점용접에서 신경회로망을 이용한 용융부 크기의 예측에 관한 연구", 대한용접학회 추계학술대회, pp.91-95
14. 최용범, 장희석, 조형석, 1993, "저항 점용접에서 인공 신경회로망을 이용한 용융부추정에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 2월호, pp393-406
15. 임태균, 조형석, 장희석, "인공신경회로망을 이용한 저항 점용접의 품질감시", 대한 용접학회 논문집, 제 11권, 제 2호(1993)
16. 김상필, 신현욱, 최덕준, 장희석, "용융부형상 판독을 위한 영상처리기법", 대한용접학회 춘계학술대회 논문집, pp132-134 (1993)