

研 究 論 文

알루미늄 합금의 저항점 용접에 관한 연구(I)

김상필* · 홍태민* · 장희석**

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

S.P. Kim*, T.M. Hong*, H.S. Chang**

Key Words : Resistance Spot Welding(저항점용접), Dynamic Resistance (동저항), Aluminum Alloy (알루미늄 합금), Dissimilar Material(이종재료), Electrode Movement (전극분리)

Abstract

Resistance spot welding has been widely used in the sheet metal joining processes because of its high productivity and convenience. In the resistance spot welding processes the size of molten nugget is a criterion to assess weld quality. Many research have founded on measuring weld nugget size at the same time monitoring welding process parameters such as dynamic resistance and electrode movement.

With increasing demand of energy saving, many efforts were made to employ aluminum alloys that are lighter than steel and have relatively equivalent strength to steel in the automobile industry.

In this paper, spot weldability of aluminum alloys for various welding conditions were examined by series of experiments. One of the 6000series(Mg-Si) aluminum alloy, 6383-T4 was chosen, which is currently considered as a substitute for the galvanized steel.

Dynamic resistance, electrode movement and corresponding nugget size were observed and compared to the case of steel. Finally, resistance spot welding of dissimilar materials (galvanized steel-aluminum alloy) was attempted.

* 학생회원, 명지대학교 기계공학과

** 정회원, 명지대학교 기계공학과

1. 序 論

저항점용접(Resistance Spot Welding)은 1877년 Elihu Thomson에 의하여 발명된 용접공정으로 두 개의 금속판을 포개어 놓고 압력을 가하면서 0.3초 이내의 짧은 시간동안 수천 암페어의 전류를 흘려 접촉저항에 의한 주울열(Joule Heating)을 발생시켜 금속판 접촉부에 타원체 모양의 용융부(Nugget)를 형성하여 접합하는 일종의 전기저항 용접공정이다. 이러한 저항용접은 용접시간이 짧고 공정이 간단하며 용접물(Workpiece)접합부 주변의 열영향부(HAZ)가 작을 뿐 아니라 잔류응력과 변형의 관점에서 다른 용접공정보다 월등히 양호하다. 현재 산업현장에서 용접질평가의 기준이 되는 인장전단강도(Tensile-Shear Strength)와 비례하는 용융부의 크기가 용접 전류, 용접전압, 전극가압력, 용접재료의 표면상태 및 전극Tip상태 등 용접조건에 미세한 변화에도 민감하게 반응하여 용접질이 매우 심하게 변화하는 단점에도 불구하고 저항용접이 대부분 사용된다. 특히 자동차산업에서 에너지 절감을 위한 차량경량화 및 대기오염 문제로 전기자동차의 필요성이 증가되는 추세이므로 경량이면서 우수한 강도를 가지는 알루미늄 합금계열의 저항용접이 요구되고 있다. 알루미늄합금은 고유저항이 작고 열전도도가 크기 때문에 연강이나 아연도금강판의 용접시 요구되는 전류를 흘려줘도 발생하는 주울열의 손실이 크다. 연강의 경우 약 3,000~15,000A 정도의 전류가 요구되나, 알루미늄합금의 열전도율이 연강보다 약 3배정도 높아서 용융부 주위의 온도상승에 의한 용접열손실이 크므로 약 10,000~30,000A 정도의 높은 전류를 필요로 하며, 낮은 용융온도와 높은 전기전도도로 인하여 짧은 용접수행시간을 필요로 한다. 또한 소성영역(약 95~200°C)이 극히 좁고 모재의 강도가 낮으므로 용접시 전극가압력에 따른 용접물의 과도한 함입(Indentation) 등 용접불량이 발생하기 쉽다.

알루미늄합금의 저항점용접에 대한 연구는 용접공정변수인 전류, 시간, 전극가압력 등이 용융부의 온도분포에 미치는 영향이나 용접후 용접물의 잔류응력을 해석하기 위하여 주로 수치해석적방법을 사용하였고^{1,2)}, 이는 박판의 용접물을 1차원적으로 해석하였으며 비열, 열전도도, 전기비저항(Electrical Specific Resistivity)등이 일정하다는 가정을 하였다.

尾崎³⁾의 연구에서는 알루미늄합금의 저항점 용접시 전극과 용접물사이의 국부적 유착현상은 용접도중의 용접전압, 용접전류 및 접촉저항 등의 변화를 야기하며 이러한 현상을 방지하기 위해서 전극에 특수한 열처리와 여러 종류의 금속을 확산 침투시키는 방법 등을 사용하였으나 이는 제한된 용접조건에서만 가능하고 전류 및 전압의 변동에 따라 다르므로 이러한 특수한 전처리과정은 산업현장에서 실제적으로 적용하기에 부적합하다. Orlov⁴⁾의 연구에서는 전극과 피용접물 사이에 기름을 유착하여 용접하였고, Ashton⁵⁾의 연구에서는 용접전에 전극과 피용접체 표면 사이에 교류아크를 발생시켜 아크의 청정작용에 의해 피용접체 표면에 산화피막을 제거하는 방법등이 제안되어 있으나 이들의 연구 또한 생산성 관점에서 산업현장 적용에 부적합한 결과이다. 아연도금강판이나 연강의 경우에도 유한요소법이나 유한차분법을 이용하여 저항점 용접과정을 용융부성장에 대한 수치해석적 모델이나 실험데이터에 근거한 경험식을 이용하여 파악하기에는, 용접공정변수들이 열물리적 현상(Thermophysical Phenomena)과 소성변형 등에 기인한 심한 비선형성을 나타내기 때문에, 한계성이 있으므로^{6,7)} 용접도중 측정가능한 용접전류와 전압의 변동을 의미하는 동저항(Dynamic Resistance)변화와 용접부내의 열물리적현상을 나타내주는 전극분리현상(Electrode Movement)등이 대표적인 용접공정 감시변수로 보고되어 있다^{8)~14)}. 따라서 본 연구에서는 경량이면서 우수한 내식성을 가지는 알루미늄합금의 저항점용접 과정에서 동저항과형과 전극분리신호를 측정하고 분석하여 용융부의 성장과정을 정성적으로 해석함으로써 용접성을 검토하고자 한다.

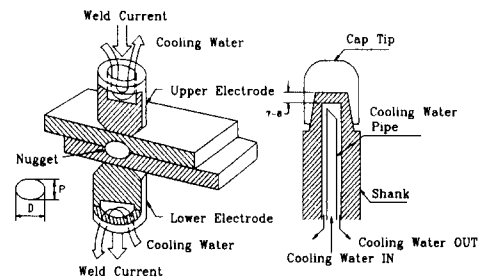


Fig.1 Schematic diagram of spot welding system and electrode geometry.

2. 實驗裝置 및 過程

2.1 實驗裝置 및 熔接試片

저항점 용접의 간략도와 전극의 형상이 Fig.1에 도시되어 있다. 본 실험에서 알루미늄합금의 저항점 용접에 사용된 용접기의 용량은 150kVA이고, 현재 산업현장에서 많이 사용되는 공기압 작동식의 정치식 저항점 용접기를 사용하였으며, 공기압조절 Regulator가 부착되어 있어 여러가지 가압력 조건에서 실험을 진행할 수 있도록 하였다. 전극의 Tip은 내마모성이 우수하고 용접물과의 용착이 적어 현재 자동차 생산현장에서 많이 사용중인 Dome Type을 사용하였으며, 전극은 RWMA Group A ClassII에서 권장하는 Cu-Cr(99.2-0.8%)인 전극봉을 사용하였다. 본 연구에서 주로 사용된 용접시편은 내식성이 우수하고 경량이며 기계적강도가 뛰어나 차량구조용으로 적합한 일본 KOBE(神戸) STEEL Co.의 두께 1.0mm의 KS6383-T4 알루미늄합금을 용접시편으로 사용하였다. 모재의 화학적 조성비(Table.1)와 상온에서의 기계적성질(Table.2)이 표시되어있다.

Table. 1 Chemical composition of Aluminum alloy (KS6383-T4)

(atm. %)					
Mg	Si	Mn	Zn	Fe	Al
1.92	3.06	0.23	0.21	0.02	Bal

Table.2 Mechanical properties of Aluminum alloy (KS6383-T4)

Thickness	Temper	Tensile Properties		
		σ_Y kgf/mm ²	σ_T kgf/mm ²	Elongation (%)
1.0	T4	14.1	25.7	28.2

2.2 實驗方法

알루미늄합금의 저항점 용접성을 조사하기위해 용접전류는 20,000A에서 36,000A까지 2,000A씩 증가시키면서 실험하였다. 용접진행과정을 정성적으로 잘 보여줄 수 있었던 용접공정변수(Welding Process Parameter)인 동저항과형과 전극분리신호는 다음 장비와 방법으로 측정한다. 동저항은 Ohm의 법칙($V=IR$)에 의해 용접도중 전극의 양단에 걸리는 전

위차를 용접전류로 나뉘줌으로써 구할 수 있다. 실제로 용접전압의 측정은 Voltage Pick-Up단자를 이용하여 측정하였으며, 용접전류는 전극 주위에 설치된 Toroid Coil에 용접중 유도되는 유도기전력을 이용하여 간접적으로 측정하였다. 위와 같이 측정되는 전위차와 용접전류는 Miyachi社의 MM326B Weld Checker를 통해 Half Cycle단위로 입력되는 Trigger Pulse신호를 감지하여 Sampling된 Data를 486PC를 통해 입력받았다. 전극분리신호의 측정은 Fig.2에서 처럼 Eddy Current 효과를 이용한 Gap Sensor를 용접기에 설치하여 Gap Sensor에서 나온 Eddy Current를 Amplifier를 통하여 0~2mm 구간내에서 선형적으로 변화하는 DC 전압으로 환산하여 A/D 변환기를 동기시켜 Half Cycle 단위의 변위를 측정하였다.

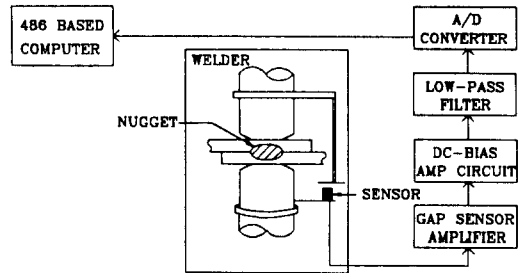


Fig.2 Block diagram of electrode movement measuring system.

2.3 組織檢査

위의 용접실험이 끝난 각각의 용접조건에 일련번호를 부여한 시편을 용접부의 정중양을 절단하여 Mounting, Polishing을 거친 후 5ml의 HF (48%), H₂SO₄ 10ml와 물 85ml을 혼합한 용액에 시편을 30초간 담가두었다가 흐르는 물에 씻는 Etching 방법을 통하여 SONY社의 CCD Camera로 촬영을 하였다. Etching한 시편에 0.05mm의 정밀눈금자를 붙여 촬영하였으며, 이때 얻어진 화상은 Data Translation社의 Image Processing Unit을 이용해 PC에 Image를 저장한 후 용융부의 크기 (Diameter, Penetration)를 화상처리 프로그램인 Global Lab에서 Image Enhancement를 거친 후 정밀기준 눈금자의 단위길이당 Pixel수를 측정하여 Scale Conversion Factor를 결정하며, 매 시편마다 얻어진 화상의 측정된 용융부 크기의 Pixel수에 Scale Conversion Factor를 곱하여

정확한 용융부의 크기를 측정하였다.¹⁹⁾ 동시에 알루미늄합금의 저항점 용접에 의한 용융부의 기공 및 균열 등의 용접불량을 검사하기 위하여 ISLAPT社의 SEM (Scanning Electron Microscopy) SM-32와 용융부, 열영향부 및 모재의 화학조성 변화를 검사하기 위하여 EDAX(Energy Dispersive Analysis of X-Ray) LEICA-440을 이용하여 500배로 용융부의 각 부분을 촬영하였다.

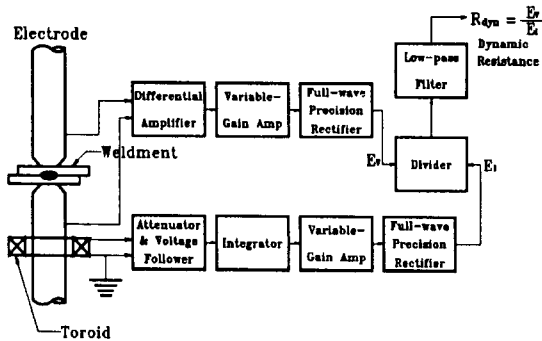


Fig.3 Block diagram of electronic instrumentation system for computing dynamic resistance.

3. 工程變數에 反映된 点熔接 過程

3.1 動抵抗波形變化와 熔融部의 成長過程

동저항(Dynamic Resistance)은 용접공정 도중 측정된 전극양단의 전압신호를 전류신호로 나누어서 용접사이클별로 변화하는 곡선으로 얻어진다. Fig.3은 용접도중 변화하는 동저항의 측정장치 개략도이다. 동저항은 피용접물 표면의 접촉저항, 온도변화에 따른 Bulk(체적)저항, 통전단면적의 변화에 따른 Contraction 저항¹³⁾등으로 구분되며, 용접물의 표면불순물과 공기중에서 쉽게 산화막이 형성됨으로서 야기되는 접촉면적의 불균일로 인하여 용접초기에는 큰 접촉저항이 나타난다. 알루미늄합금의 경우는 아연도금강판의 경우보다 공기중에서 더욱 쉽게 산화막을 형성하여 용접초기의 저항에 큰 영향을 미치며, 연성(Ductility)이 풍부하기 때문에 용접가압력의 변화와 시편표면의 작은 돌기들의 영향으로 큰 저항변화를 나타낸다. Fig.4(a)는 아연도금강판(SGACC)과 알루미늄합금의 경우 동저항의 변화에 따라 각 구간별로 나타나는 현상을 도시한 모식도이다.^{8,12-14)} Fig.4(a)의

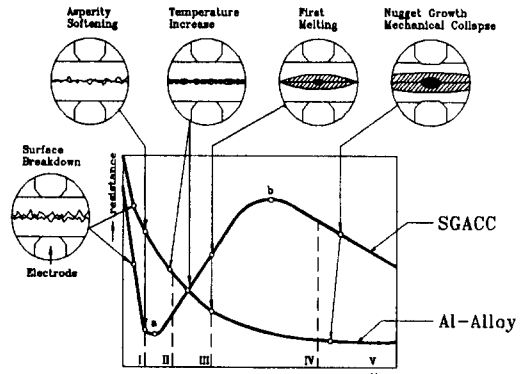


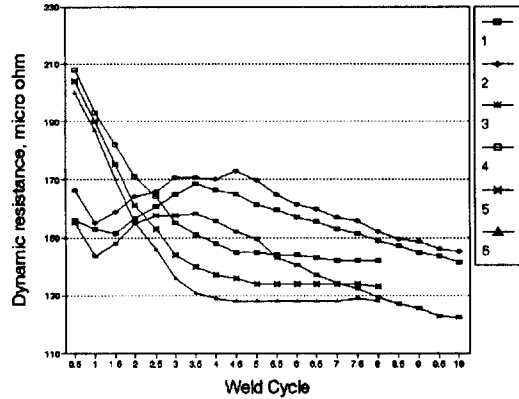
Fig.4(a) Typical dynamic resistance curves.

구간 I에서, 용접기 변압기의 1차 코일에 전압이 인가되면 2차코일에는 처음엔 개방회로의 전압(Open-Circuit Voltage)이 전극양단에 걸린다. 이때, 용접시편의 접촉면에서의 표면 산화막 때문에 절연저항이 수 Mega Ohm(MΩ) 정도로 나타난다. 보통 이러한 현상은 전압이 인가된 후 수밀리초(Milisecond)정도 지속되며 접촉점의 절연상태가 파괴되기 이전까지는 전류가 거의 흐르지 않게 된다. 전류가 흐르기 시작하면 접촉면의 절연 상태가 급격히 파괴되어 동저항의 매우 빠른 감소현상이 일어난다. 이 구간에서는 시편표면의 산화막이 불균일하고 산화막의 종류와 두께 및 전극가압력의 크기에 따라 초기저항치와 저항감소율이 크게 달라지는 현상을 보인다. 아연도금강판의 경우 아연도금피막이 깨지면서 알루미늄합금의 경우보다 급격한 저항감소현상을 나타내며, 연성이 풍부한 알루미늄합금은 가압력에 의하여 아연도금강판의 경우보다 표면돌기의 붕괴가 쉽게 일어나므로 용접중 동저항의 변화는 완만하게 진행된다. 구간II에서는 전류가 흐르면서 아연도금강판의 경우 온도상승에 의한 접촉면의 연성이 증가하여 접촉면적이 증가하면서 저항은 감소하나 온도상승에 의한 체적저항의 증가로 서로 상쇄되어 평형상태를 이루는 과정이 a점으로 나타난다. 이 점을 지나면서 온도상승에 의한 저항증가의 효과가 접촉면증가에 의한 저항감소의 효과를 상쇄시켜 동저항은 상승을 한다. 반면, 알루미늄합금의 동저항은 재료의 낮은 용융온도와 높은 열전도도 때문에 접촉부위에서 국부적으로 발생된 열은 쉽게 잃어버리는 반면, 전극가압력에 의하여 연화된 조직이 소성변형을 일으키며 접촉면적이 증가한다. 이로 인한 저항감소효과가 지배적으로 나타나며 온도상승에 의한 저항증가효과를

상쇄시키며 동저항은 계속 감소하게 된다. 구간III에서의 동저항은 아연도금강판의 경우 온도상승과 더불어 계속 상승하다가 이 구간이 끝나는 점에서 용접시편의 접촉부에서 부분적 용융이 일어난다. 한편 알루미늄 합금의 경우 온도상승에 의한 체적저항증가의 효과보다는 온도상승으로 연화된 부위가 넓어져 전극가압력이 전류가 흐르는 단면적을 증가시키기 때문에 저항은 감소되며, 이 구간에서도 이러한 저항감소의 효과가 지배적으로 나타나며 이 구간이 끝나는 부근에서 부분적으로 용융이 일어나기 시작한다. 구간IV에서는 아연도금강판의 경우 전체 용접시편의 온도가 상승하여 저항을 증가시키는 반면 계속되는 열입력에 의해 용융이 진행되며 접촉면적이 증가하여 전류가 흐르는 단면적을 증가시키기 때문에 저항은 감소한다. 이러한 증감의 효과가 상쇄되어 평형을 이루는 점이 b이며, 이 점을 통과하면서 용융부가 확산되고 소성역에 도달한 용융부 주위의 연화된 조직이 더이상 전극가압력을 지탱하지 못하고 전극이 용접시편속으로 밀려드는 함입(Indentation) 현상이 일어나며 서로 가까워지기 때문에 전류의 경로를 짧게하여 동저항의 급격한 하강을 가져온다. (구간V) 한편 알루미늄합금의 경우 계속되는 열입력으로 온도가 상승하여 체적저항이 증가하므로 이 저항증가 효과가 용융부와 소성역이 확장됨으로서 통전면적이 증가하며 나타나는 저항 감소효과를 부분적으로 상쇄시킴으로 저항의 감소율은 구간 I ~ II보다 둔화된다. 구간V에서 알루미늄합금에서는 아연도금강판이나 연강의 경우 동저항이 계속 감소 현상을 보이는 것과는 달리, 용융부 주변이 소성역에 도달하여 전극의 가압력을 지탱하지 못하고 함입현상이 계속 진행되어 전극이 가까워지며 전류의 경로가 짧아짐과 동시에 용융부확산에 의한 접촉면적의 증가로 야기되는 저항감소 효과가 온도상승에 의한 체적저항증가 효과와 거의 평형상태를 유지하여, 동저항값이 변하지 않는다.

Fig.4(b)는 실제 용접과정에서 얻어진 아연도금강판(SGACC)과 알루미늄합금의 동저항 파형의 변화이다. 아연도금강판의 경우보다 알루미늄합금의 경우 접촉표면에서의 산화피막에 의한 초기저항이 매우 크고 용접이 진행되면서 저항은 계속 감소하면서 용융부가 성장하며 용접후반부에서 동저항이 일정하게 나타나는 현상이 아연도금강판이나 연강의 경우와 뚜렷한 대조를 보인다.

Fig.5(a)는 전극가압력을 일정하게 할 경우 전류의



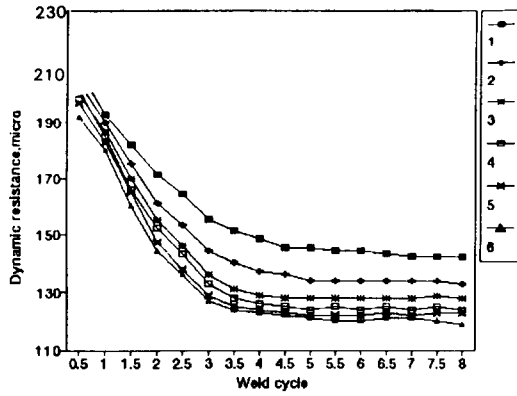
Weldment Thickness : SGACC=0.8mm,Al alloy=1.0m

	SGACC			Al-alloy		
	1	2	3	4	5	6
Current(kA)	8.5	8.5	9	20	24	30
Force(kgf)	250	300	250	300	250	300

Fig. 4(b) Comparison of dynamic resistance curves.

증가에 따른 동저항파형의 변화를 나타낸다. 용융부의 온도상승에 의한 체적저항증가율과 용융부확산에 의한 저항감소율이 거의 평형을 이루기 때문에 전류증가에 따른 효과보다 재료의 연성이 동저항의 감소율이 심하게 변화하지 않음을 보여준다. 동저항은 전류량과 관계없이 일정한 감소경향을 보이나 용접후반기의 평형상태에 도달한 값이 용접전류에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 동저항의 값은 용융부의 크기(Table.3)와 훌륭한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

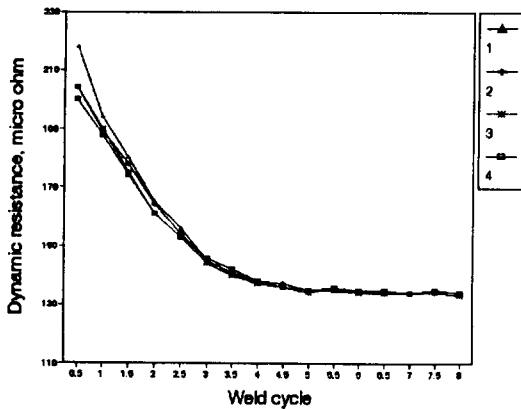
Fig.5(b)은 일정한 용접전류를 유지할 경우 전극가압력의 변화에 따른 동저항의 변화곡선을 도시한 것이다. 가압력의 증가는 용접시편의 표면돌기 및 산화막의 붕괴과정에 영향을 끼쳐 용접초기 저항의 변화만을 야기하며 용접이 진행됨에 따라 전극의 가압력이 200kgf~350kgf범위로 증가하여도 저항의 변화는 거의 나타나지 않는다. 시편두께가 동일하고 용접전류를 26kA, 28kA, 30kA, 32kA로 변화시키고 각각의 전류에 대하여 가압력을 200kgf~350kgf로 변화시켜도 동저항의 가압력에 따른 변화는 Fig.5(b)와 동일한 경향을 보였다.



(a)

Weldment Thickness=1.0mm, Force=300kgf

	1	2	3	4	5	6
Current(kA)	20	24	28	30	32	34



(b)

Weldment Thickness=1.0mm, Current=24kA

	1	2	3	4
Force(kgf)	200	250	300	350

Fig.5 Dynamic resistance of Al alloy

3.2 電極分離波形과 熔融部の 成長過程

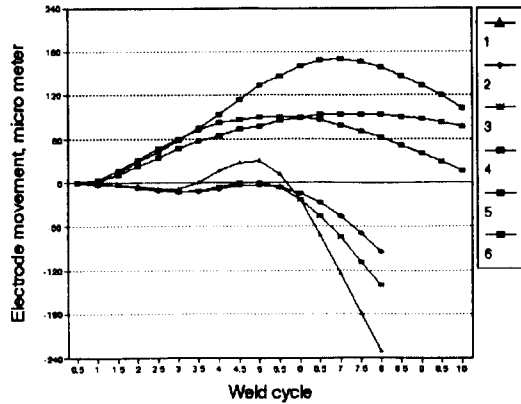
저항점 용접시 용접시편의 열팽창은 용융부의 열물리현상(Thermophysical Phenomena)을 잘 반영해주는 일반적으로 많이 사용되는 파라미터이며, 이는 비접촉식 변위 측정장치인 Gap Sensor를 사용하여 전극분리현상의 파형을 측정함으로써 알 수 있다. Fig.2는 전극분리신호를 측정하는 시스템의 간략도이다. 전극분리현상은 저항점 용접시 전류가 흐르기

Table. 3 Nugget sizes for various welding conditions.

가압력(kgf)	전류(kA)	직경(mm)	두께(mm)	비고
200	22	2.790	0.540	B
	24	4.120	0.810	B
	26	4.523	0.570	
	28	5.625	0.580	
	30	6.267	1.030	
	32	6.071	1.001	T
250	34	6.628	1.106	E
	24	2.891	0.551	B
	26	4.368	0.790	
	28	4.722	0.879	
	30	5.991	0.976	
300	32	6.535	0.911	
	34	5.741	0.725	T
	24	2.730	0.560	
	26	2.892	0.687	
	28	3.423	0.711	
	30	5.066	0.678	
350	32	5.290	1.010	
	34	6.400	0.872	T
	24	2.590	0.750	
	26	3.860	0.783	E
	28	5.690	0.589	E
	30	4.257	0.837	E
	32	4.186	0.767	S
	34	6.324	0.661	E
36	6.824	0.690	T	

S : 시편표면 Spatter. E : Expulsion.
T : Tip 용착. B : Stuck weld.

시작하면 두 금속판 사이의 접촉저항에 의해 발생된 주열로 인하여 금속판이 열팽창을 일으키고 전극 가압력을 이기며 전극이 서로 멀어지는 현상이다. Fig.6(a)는 실제 용접과정에서 용접사이클별로 나타나는 아연도금강판과 알루미늄합금의 전극분리 신호 파형이다. 아연도금강판이나 연강의 경우 초기 열입력에 의한 열팽창에 의하여 전극이 계속 멀어지나 알루미늄합금은 연성이 풍부한 재료의 특성상 용접 초기에는 전극의 가압력과 초기전류에 의하여 시편과 시편사이의 접촉면, 시편과 전극의 접촉면에서 표면 산화막과 표면돌기가 붕괴되어 전극이 서로 가까워지는 현상이 일어난다. 계속되는 열입력에 의하여 접촉면에서 용융부가 형성되기 시작하며 용융부 주위는 열팽창을 하게 되어 전극이 서로 멀어지는 전극분리현상을 일으키며 거의 선형적으로 증가하여 전극분리신호는 최대점에 도달한다. 계속되는 열입력에 의하여 용융부가 확산되며 연화된 주위의 조



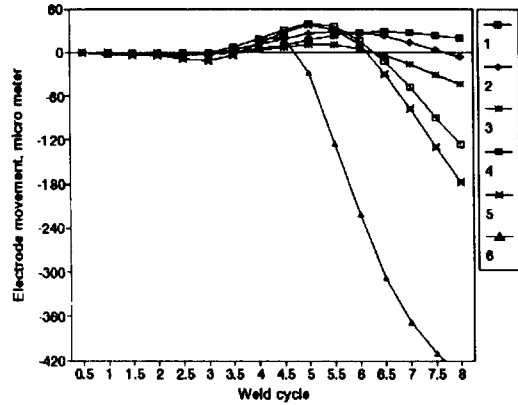
Weldment Thickness : Al alloy=1.0mm,SGACC=0.8mm

	Al-alloy			SGACC		
	1	2	3	4	5	6
Current(kA)	32	28	32	8.5	8.5	9
Force(kgf)	250	300	300	250	300	350

Fig.6(a) Comparison of electrode movement for Al alloy and SGACC.

직은 전극의 가압력을 더이상 지탱하지 못하고 합입이 일어나며 전극이 서로 가까워진다. 아연도금강판의 경우 용접후반부에서 전극분리신호의 최대점에 도달하며 전극의 합입이 일어나지만 알루미늄합금은 용접 중반부에서 최대점에 도달한다. 알루미늄합금은 아연도금강판보다 재료의 연성이 풍부하여 용융부 주위의 소성영역에 도달한 금속조직이 쉽게 밀려나며 재료의 열팽창에 의한 전극분리신호의 증가효과보다 용융부의 확산 및 합입에 의한 전극분리신호의 감소효과가 더욱 크게 나타난다. 실제 용접공정에서 외란(Disturbance)의 효과로 해석할 수 있는 용접전원의 변동, 전극가압력의 변동, 전극의 마모, 표면 산화막, 용접물의 불균일, 분류효과(Shunt Effect) 등의 현상은 용융부로 흐르는 유효전류의 변동을 야기시키고 용접질을 저하시키며 동일조건에서 불균일한 용융부가 형성된다. 이러한 외란의 영향은 전극분리신호의 파형 변화에 반영되므로 이를 측정함으로써 위와 같은 현상을 간접적으로 모니터링 할 수 있다.^{8~13)}

Fig.6(b)은 동일 압력하에서 전류를 증가시키며 얻어진 알루미늄합금의 전극분리신호이다. 이 그림에서 3 Cycle까지는 시편과 시편사이의 표면돌기가 열의 영향을 받아 연화되는 구간이며, 용융되기 직전까지 전극이 기준면보다 낮아지고 이는 Fig.4(a)의 구간II에 해당한다. 이후 부분적인 용융이 일어나며



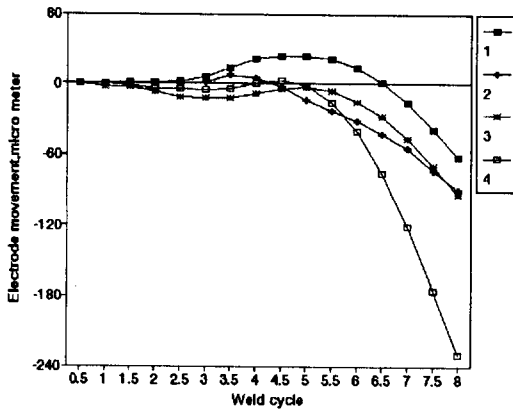
Weldment Thickness=1.0mm, Force=250kgf

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

Fig.6(b) Electrode movement of Al alloy for various weld currents.

계속되는 열입력량에 의하여 최대값에 도달할 때까지 전극분리신호는 거의 선형적으로 증가하다. 용융부가 급속히 확산되면서 용융부 주변의 연화된 조직이 전극가압력을 더이상 지탱하지 못하면서 전극분리신호의 증가율이 서서히 감소하여 최대점에 도달하게 된다. 용접전류가 커질수록 최대점에 도달하는 Cycle이 빨라지는 것을 Fig.6(b)에서 알 수 있다. 용접이 진행되면서 용접후반부에는 열입력의 증가에 비례하여 감소율이 커지며 전극분리신호의 최저점은 낮아지는 현상을 보인다. 과도한 열입력의 경우는 용융부가 시편과 시편의 연화된 조직들 사이를 통하여 외부로 분출되는 용출(Expulsion)현상을 초래하게 된다.

Fig.6(c)는 동일 전류조건에서 압력을 증가시켜가며 얻어진 전극분리신호이며, 용접초기에 표면돌기의 붕괴 및 접촉면적의 증가로 기준면보다 낮아지는 현상은 전극가압력이 증가할수록 뚜렷하다. 전극가압력이 증가함에 따라 기준면보다 낮은 위치에서 전극분리신호가 최대에 도달하게 되며 이는 아연도금강판에서보다 훨씬 낮은 위치임을 알 수 있다.(Fig.6(a)참조) 이상의 현상을 고찰해 보면 전극분리신호는 아연도금강판이나 연강의 경우와 마찬가지로 알루미늄합금에서도 용접공정변수인 용접전류와 전극가압력의 변화에 따른 용접특성을 훌륭하게 반영해



Weldment Thickness = 1.0mm, Current = 28kA

	1	2	3	4
Force (kgf)	200	250	300	350

Fig. 6(c) Electrode movement of Al alloy for various electrode forces.

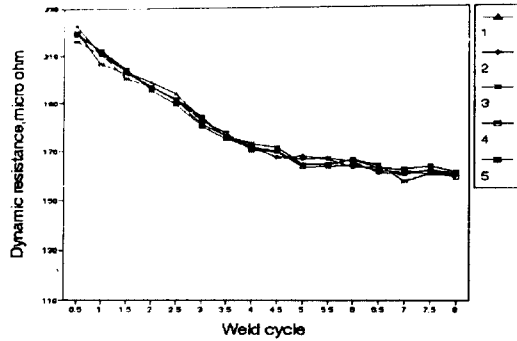
음을 알 수 있다.

4. 異種材料의 熔接

공해문제가 심각한 사회문제화 되면서 이의 해결을 위한 전기자동차의 개발과 에너지 절감목적으로 차량경량화를 실현하려면 알루미늄합금간의 용접뿐만 아니라 알루미늄합금과 아연도금강판의 용접이 반드시 필요하며 볼트이음이나 리벳이음대신에 높은 생산성을 위한 용접자동화 문제를 해결하기 위해서는 이들 이종재료의 저항점용접이 요구된다. 이종재료 용접에 대한 연구는 주로 동종재료에서 두께가 다른 경우의 용접과 동일계열의 합금에 첨가원소를 달리 하거나 열처리방법을 달리한 경우에 대한 연구가 시도되었다.^{17,18)} 본 연구에서 사용된 이종재료는 현재 자동차 생산공정에 차량구조용으로 사용되는 아연도금강판(SGACC)과 내식성이 우수하고 인장강도 및 굽힘강도가 비교적 우수한 KS6383-T4계열의 알루미늄합금이다. 알루미늄합금은 아연도금강판의 경우보다 열전도율이 높고 연성이 풍부하며 용융온도(655°C)가 현저하게 낮기 때문에 이들 이종재료간의 용접은 어려운 문제로 남아 있다. 알루미늄합금은 전극과 융착되기 쉽고 연성이 풍부하기 때문에 짧은

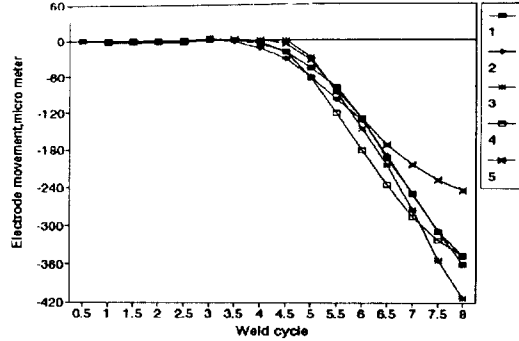
통전시간과 높은 용접전류를 필요로 하며, 아연도금강판은 용융온도(1492°C)가 높고 비교적 긴 용접시간을 필요로 한다. 아연도금강판이 용융온도에 도달하기 전에 알루미늄합금은 용융이 일어나 용융부가 확산되기 쉽다. 알루미늄합금과 아연도금강판의 경계부근에서 알루미늄합금과 아연도금피막이 접촉저항에 의하여 발생된 열에 의하여 알루미늄합금의 용융이 일어나며 용접이 되기 보다는 Bonding에 가까운 접합의 형태를 보인다.

본 연구에서는 아연도금강판쪽의 전류밀도를 높이기 위하여 아연도금강판쪽의 상부전극Tip 직경을 6mm로 고정하고 알루미늄합금쪽의 전극Tip 직경을 6mm, 8mm, 12mm로 변화시켜가며 동저항과형 및 전극분리신호를 측정하였다. 상·하부 전극의 직경이 6mm로 동일할 때 Fig. 7(a)는 동저항의 변화이며 알루미늄합금간의 용접에 비하여 용접 초기에는 아연피막의 깨짐과 아연도금강판과 알루미늄합금의 온도상승에 따른 저항증가의 효과보다 접촉표면의 증가로 인한 저항감소효과가 더 크게 나타나며 동저항은 감소하지만, 알루미늄합금간의 용접초기에 나타나는 동저항의 감소보다는 완만한 감소율을 나타내며, 용접 후반부에서의 동저항은 평형상태를 이루지 못하고 계속 감소한다. 그러나 용접초기부터 용접이 끝날 때까지 전체적인 동저항 변화는 알루미늄합금 용접보다 높은 저항값을 나타낸다. (Fig. 5(a)참조) Fig. 7(b)는 상부전극Tip 직경을 6mm, 하부전극Tip 직경을 8mm로 가공하여 용접한 동저항의 변화이며 용접초기에 접촉면적의 증가로 인하여 동저항은 작아지며 용접후반부로 진행할 수록 Fig. 7(a)와 같은 경향을 보이며 동저항은 감소를 한다. Fig. 7(c)는 상부전극Tip 직경을 6mm, 하부전극Tip 직경을 12mm로 하여 용접하였으며, 전류를 증가시켜 아연도금강판쪽의 전류밀도를 알루미늄합금 강판보다 상대적으로 높여도 Fig. 7(a)와 비슷한 경향을 보이며 동저항은 감소하지만, 용접후반부의 동저항값은 열입력의 증가에 따라 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 동저항의 변화는 용접후반부로 갈수록 용융부 주위의 온도상승에 따른 저항증가 효과보다 알루미늄합금의 연성에 의하여 전극이 가까워져 전류의 경로를 짧게 하여 동저항이 낮아지며 용융부에서 발생한 열이 알루미늄합금쪽의 넓은 전극을 통하여 방출되어 동저항은 계속 떨어지게 된다. Fig. 8(a)는 이종재료용접의 전극분리신호 파형변화이며 알루미늄합금의 전극분리신호 파형에서 나타났던 용접초기의 표면



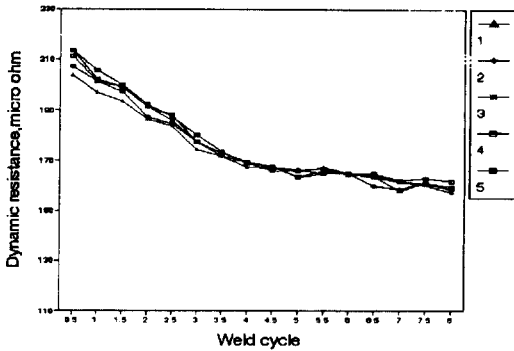
(a)

Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 6mm
Force = 330kgf, Current = 16.3kA



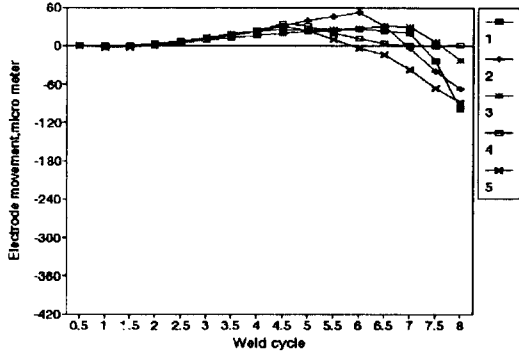
(a)

Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 6mm
Force = 330kgf, Current = 16.3kA



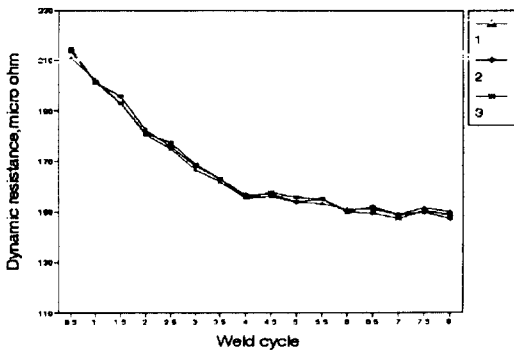
(b)

Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 8mm
Force = 330kgf, Current = 16.3kA



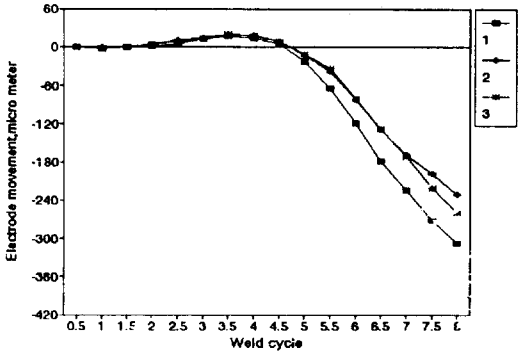
(b)

Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 8mm
Force = 330kgf, Current = 16.3kA



(c)

Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 12mm
Force = 330kgf, Current = 20kA
Weldment Thickness : Al alloy = 1.0mm, SGACC = 0.8mm
Fig.7 Dynamic resistance of dissimilar metals.



(c)

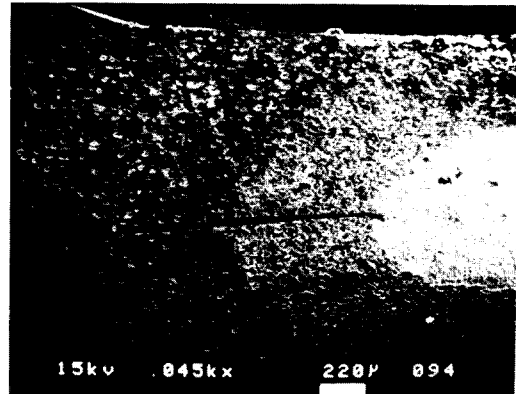
Upper electrode for SGACC : 6mm
Lower electrode for Al alloy : 12mm
Force = 330kgf, Current = 20kA
Weldment Thickness : Al alloy = 1.0mm, SGACC = 0.8mm
Fig.8 Electrode movement of dissimilar metals.

돌기의 붕괴로 인한 전극이 가까워지는 현상은 아연도금강판쪽의 강성 때문에 거의 찾아볼 수 없다. Fig.8(b)와 같이 전극의 직경이 커지면 알루미늄합금과 전극의 접촉면이 넓어지고 전극의 함입은 어렵기 때문에 알루미늄합금간의 용접에서 관찰되었던 초기에 전극이 가까워지는 현상은 거의 찾아볼 수 없었다. Fig.8(c)는 알루미늄합금쪽의 전극Tip을 12 mm로 하여 전류를 증가시켜 통전면적의 전류밀도를 높여 용접한 결과이며, 열입력의 증가에 따라 전극 분리신호는 Fig.8(b)와 비교하면 짧은시간에 최대점을 통과한 후 전극의 함입현상은 더욱 크게 나타나고 Fig.10(a)과 같이 Bonding(접합)으로 보인다.

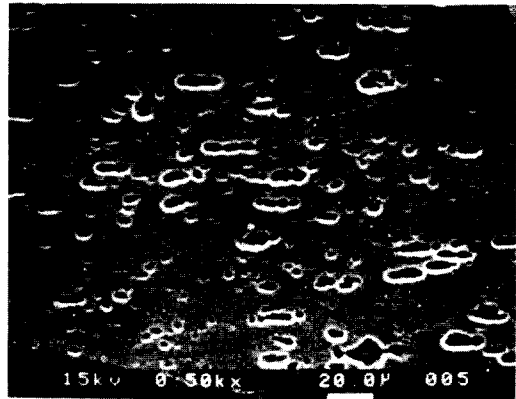
5. 熔接部の 金屬組織 考察

Fig.9(a)는 알루미늄합금의 용접시 용융부 중앙 절단면을 촬영한 사진이다. 시편표면과 전극사이의 접촉면이 전극과 쉽게 반응하여 손상된 형상을 나타내며, Fig.9(b)는 용접에 의한 열의 영향을 받지 않은 알루미늄합금의 Base Metal이다. Fig.9(c)는 용융부의 중앙부근이며 용융에 의하여 용질원소들이 재결정을 일으키고 천이금속이 심한 열순환을 일으키므로 이 구역에 있던 결정립은 성장하여 Dendrite조직이 형성된 사진이다. Fig.9(d)에서는 용융부 내부의 균열이 관찰되었다. 이러한 균열은 알루미늄합금의 첨가원소가 용융 후 냉각되면서 용질원소들이 재분배를 일으키며 응고될 때 균열생성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있고¹⁶⁾, 또한 용융부 응고시 급속한 냉각에 의하여 수축하면서 발생한다. 용융이 일어날 때 용체의 온도는 대단히 높고 모재와 냉각수가 열을 흡수하기 때문에 액상에서는 초기에 큰 온도구배(Thermal Gradient)가 존재하여 열충격(Thermal Shock)에 의한 고온균열이 쉽게 발생한다. 이러한 균열 및 기공은 용접물의 인장 및 굽힘 강도의 저하와 진동이나 충격에 의한 피로파괴에 큰영향을 미치므로, 알루미늄합금의 저항점 용접시에는 용접 후반부 이후에 균열 및 기공의 발생을 억제하기 위하여 전극가압력을 높여주는 이단가압과 용접후 냉각에 따른 용융부의 균열을 방지하기 위하여 용접 후기에 전류를 흘려주는 후열처리과정이 필요하다. Fig.9(e)는 용융부와 열영향에 의하여 변화된 조직인 HAZ의 경계층을 나타내고 있으며 Corona Bonding(접합)은 없는 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 본

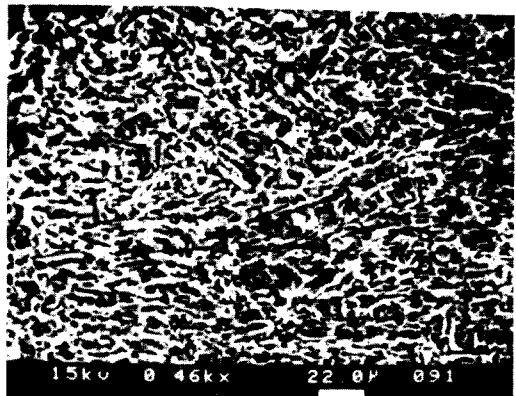
실험에서 용접시편의 표면처리를 하지 않은 결과이며 표면처리를 하면 산화막(Al_2O_3)이 제거되기 때문에



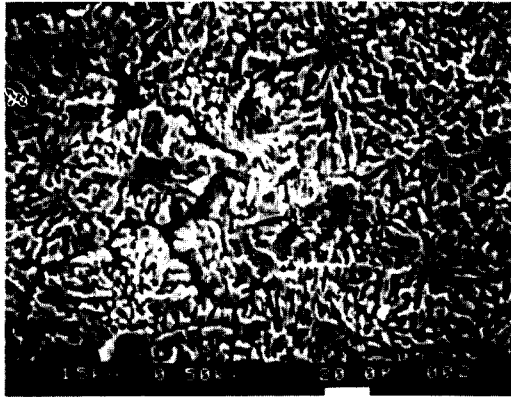
(a) Cross section of weldment, 45X.



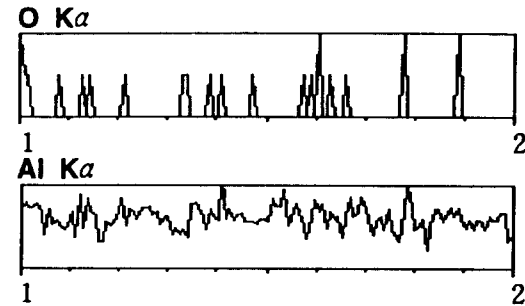
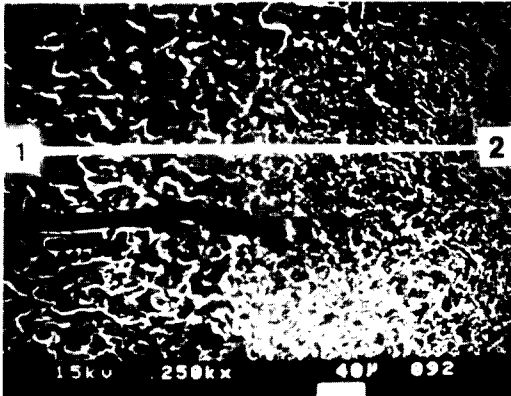
(b) Base Metal, 500X.



(c) Nugget, 460X.

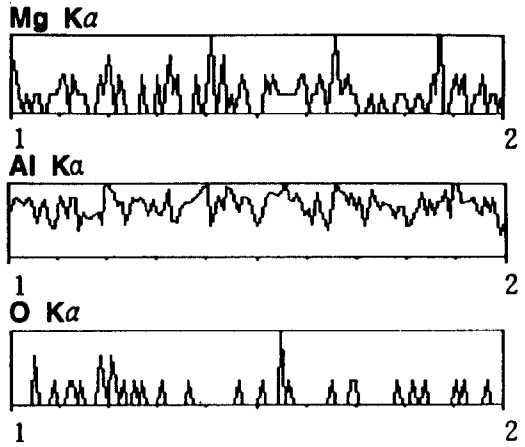
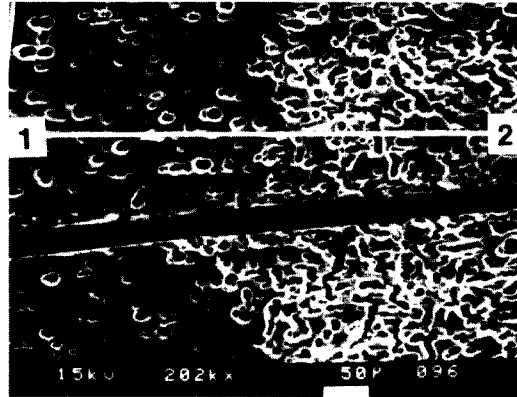


(d) Crack in Nugget, 500X.



(e) Interface between HAZ(left) and nugget (right), and EDAX spectrum across the interface, 250X.

HAZ와 용융부의 화학적 조성을 검사하기 위하여 HAZ에서 용융부로 Line Scan하여 얻어진 EDAX 스펙트럼은 산소와 알루미늄 원소의 분포를 보여준다. Fig.9(f)는 열영향을 받지 않은 알루미늄합금의 Base Metal과 HAZ의 경계층을 나타내고 있다. Base Metal과 HAZ를 가로질러 Line Scan하여 구해진 EDAX 스펙트럼은 화학조성변화를 나타내고 있다.

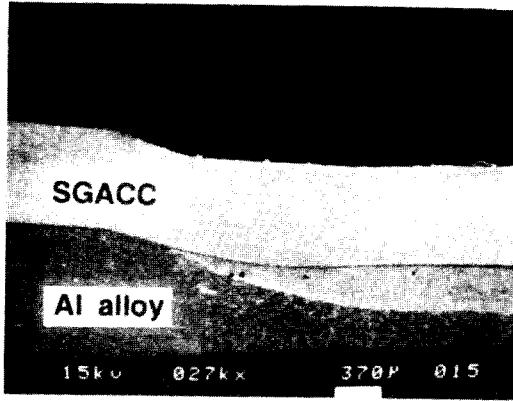


(f) Interface between base metal(left) and HAZ(right), and EDAX spectrum across the interface, 200X.

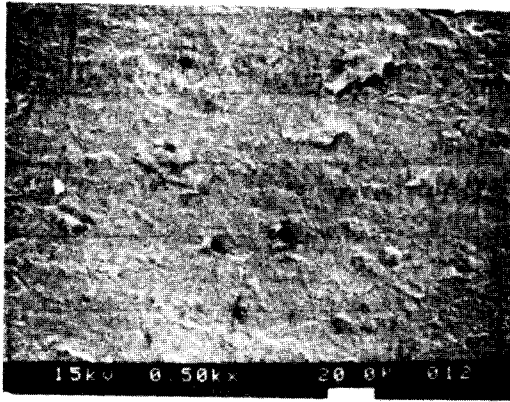
Fig.9 Photomicrographs of cross section of spot welded Al alloy.
 Electrode force=300kgf, Weld current=32kA
 Weld cycle=8 cycle, Electrode tip diameter=6mm

Table.3은 본 실험에서 사용된 KS6383-T4 시편의 용접조건과 용융부의 크기 및 파괴검사를 거친 시편의 조직사진 결과 관찰된 용융부의 결함을 포함한 표이다.

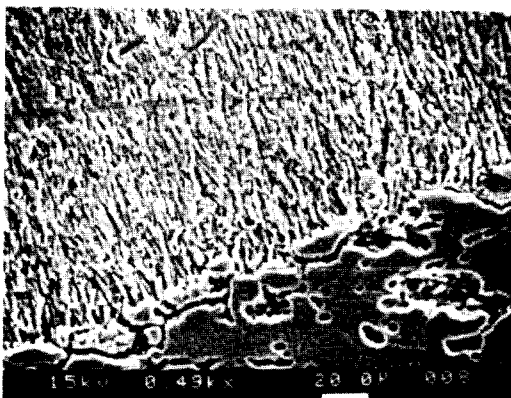
Fig.10(a)은 알루미늄합금과 아연도금강판의 이중재료용접의 단면사진이다. 알루미늄합금쪽의 전극 Tip직경이 넓기 때문에 재료표면의 함입은 거의 나타나지 않고 냉각수에 의한 열의 방출이 많아 알루미늄합금의 용융부와 모재사이의 경계가 뚜렷하다. 아연도금강판쪽의 전극 Tip직경은 작기 때문에 전극 가압력에 의한 함입이 일어났다. Fig.10(b)는 용접에



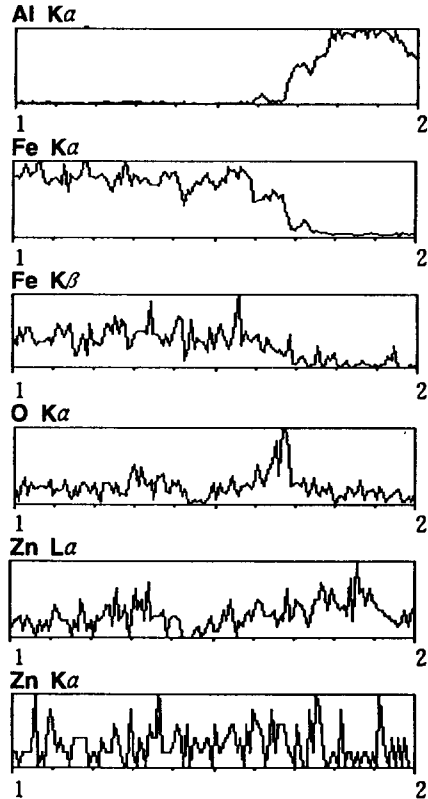
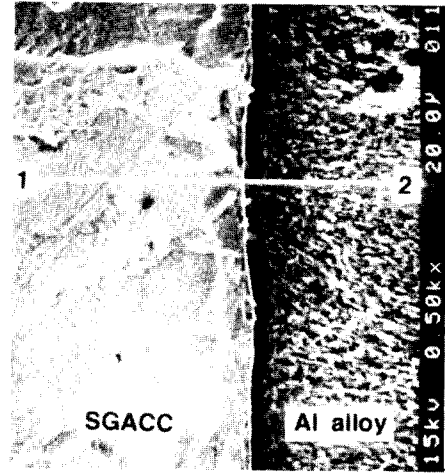
(a) Cross section of weldment, 27X.



(b) Base metal of SGACC, 500X.



(c) Interface between nugget(top) and base metal (bottom) in Al alloy, 500X.



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

Fig.10 Photomicrographs of cross section of spot weld joining Al alloy to SGACC.

Electrode force=330kgf, Weld current=19.6kA, Weld cycle=8 cycle

Upper electrode tip diameter for SGACC=6mm

Lower electrode tip diameter for Al-alloy=12mm

열영향을 받지 않은 아연도금강판의 Base Metal을 나타낸다. Fig.10(c)에서는 알루미늄합금의 용융부와 Base Metal의 경계층이 뚜렷하게 나타나며 냉각면적의 증가에 따른 급속한 냉각으로 HAZ가 거의 존재하지 않는 형태를 나타낸다. Fig.10(d)에서 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.

6. 結 論

본 연구에서는 알루미늄합금의 저항점 용접성을 고찰하기 위하여 전류와 전극가압력을 광범위한 조건으로 변화시켜가며 실험하였다. 저항점 용접도중 생성되는 용융부의 형성과정을 잘 나타내주는 용접 공정변수인 동저항파형과 전극분리신호를 측정함으로써 용융부의 성장과정을 정성적(Qualitatively)으로 규명하였다.

이종재료간의 저항점 용접은 용융점이 높은 재료 쪽의 전류밀도를 높이기 위하여 전극Tip직경의 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, 용접 후반부에 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.

後 記

본 연구는 "1993년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 ME93-E-22)"의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- 1) G.R.ARCHER : Calculation for Temperature Response in Spot Welds, Welding Journal Aug 1960., pp.327S-330S.
- 2) PIETER HEHL, SINDELINGENETAL : Factors affecting temperature distribution and its Calculation in the A.C. and D.C. Resistance Spot Welding of Aluminum Sheet, Welding and Cutting(2), 1984., pp.E25-E27.
- 3) 尾崎 : アルミニウムスポット溶接用電極, 輕金屬溶接, 1970., pp.78~85.
- 4) B.D.Orlov. : The mass transfer of metals in the electrode workpiece contend in the resistance welding of Al Alloy and Mg Alloy., Svar., Proiz., 1976., pp.10~12.
- 5) R.T.Ashton., D.D.Rager., : An arc cleaning approach for resistance welding aluminum., Welding Journal, 55-9, 1976., pp.750~757.
- 6) Kuchar N.R., Cohen R.K., Nied H.A., and Godwin S.J. : A Close-loop Control System for Resistance Spot Welding, Measurement and Control for Batch Manufacturing, D.E.Hardt, ed. Book No, H00244., ASME, New York, 1982., pp.89-103.
- 7) Wood R.T., Bauer L.W., Behard J.F., Benstain B.M., Czechowski J., D'Andnea M.H., and Hogle R.A. : A closed-Loop control System for Three Phase Resistance Spot Welding, Welding Journal, Dec., 1985., pp.26~30.
- 8) Godern S.A., Sorensen C.D., Ulrish K.T. and Edgar T.R. : 1987, Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance

- Spot Welds, *Welding Journal*, Dec 1987., pp.387-385.
- 9) Waller D.N and Knowlson P.H. : Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding, *Welding Journal* April 1965., pp.168s~174s
 - 10) Chang H.S., Cho Y.J, Choi S.G., and Cho H.S. : 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, ASME, Book NO.H00370, New York, 1986, pp.83~93.
 - 11) Chang H.S., Cho Y.J, Choi S.G., and Cho H.S., : A proportional-Integral Controller for Spot Welding Using Nugget Expansion, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and control*, Vol.111, NO.2, June 1989., pp.332~336.
 - 12) 장희석, 조형석 : 용접질 향상을 위한 저항점용접 공정의 제어기 개발에 관한 연구, *대한기계학회 논문집* 제 13권 6호, 1989., pp.1156~1169.
 - 13) Chang H.S. : In-Process Monitoring and Control of Weld Nugget Geometry for Resistance Spot Welding Process, Ph.D. Thesis 1989., KAIST.
 - 14) Chang H.S., Cho H.S. : Estimation and Control of Weld Nugget Size in Resistance Spot Welding Process, *Sensors for Manufacturing, PED-Vol.26, ASME Book No.G00405, NewYork, 1987., pp.215-227.*
 - 15) 최용범, 장희석, 조형석 : 저항점용접에서 인공 신경회로망을 이용한 용융부 추정에 관한 연구, *대한기계학회 논문집*, 2월호, 1993., pp.393-406.
 - 16) 김환태, 황선효, 남수우 : 용접구조용 7000계열 고장력 Al-Zn-Mg합금의 용접특성과 용접균열에 관한 연구, *대한용접학회 논문집*, 제12권 제1호, 3월, 1994., pp.28-37.
 - 17) RWMA : *Resistance Welding Manual*, 4th Edition, Dec 1989., pp.11-5~11-30.
 - 18) KAISER ALUMINUM & CHEMICAL SALES, INC. : "Welding Kaiser Aluminum", 2nd Ed., Kaiser Aluminum, 1978., pp.11-6~11-30.
 - 19) 김상필, 신현욱, 최덕준, 장희석 : 용융부 형상 판독을 위한 영상처리기법, *대한용접학회 춘계 학술대회 논문집*, 1993., pp.132-134.