

## 알루미늄 합금의 저항 점용접

한 용 섭\*

### Resistance Spot Welding of Aluminum Alloys

Y. S. Han\*

#### 1. 서 론

1970년대 초와 말 두차례에 걸친 세계석유파동 이후 구조물의 설계에서는 에너지 절약을 위한 경량화가 중요하게 되었으며, 이에 따라 사용재료도 비중이 큰 재료에서 점차 비중이 낮은 가벼운 재료로 대체되고 있다. 알루미늄 합금은 그들의 낮은 비중에 비해 강도가 비교적 높을 뿐만 아니라, 가공성 및 내부식성도 우수하기 때문에 경량화 재료로 많이 사용되고 있다. 또한 사용범위도 일반 가정용품에서부터 자동차 및 우주항공분야까지 매우 다양하다. Fig. 1은 연도별에 따른 비철재료의 세계 총소비량을 나타낸 것으로, 알루미늄 합금의 사용량이 다른 비철재료에 비해 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다<sup>1)</sup>.

알루미늄합금의 용접방법으로는 TIG, MIG 등의 보호가스 용접이 주로 사용되고 있으며, 저항점 용접방법도 많이 사용되고 있다. 이들중 저항점 용접방법은 빠른 용접 속도 뿐만 아니라, 로봇의 적용 등의 자동화가 가능하기 때문에 두께 5 mm 이하의 박판 대량 용접시에 특히 많이 적용할 수 있다. 그러나 점용접 방법은 비파괴 검사에 의한 품질검사 방법이 어려울 뿐만 아니라, 알루

미늄 합금의 경우 용접품질이 불안정하고, 용접부 수명도 일반 강관의 용접시보다 매우 짧기 때문에 중요 부위에서의 적용은 제한되고 있다.

본고에서는 알루미늄 합금의 저항점 용접시 용접부 품질 및 용접부 수명에 미치는 요소들에 대해 설명하고, 독일 규격에 따른 점용접 구조물의 설계시 강도 계산방법에 대하여 간단히 기술하고자 한다.

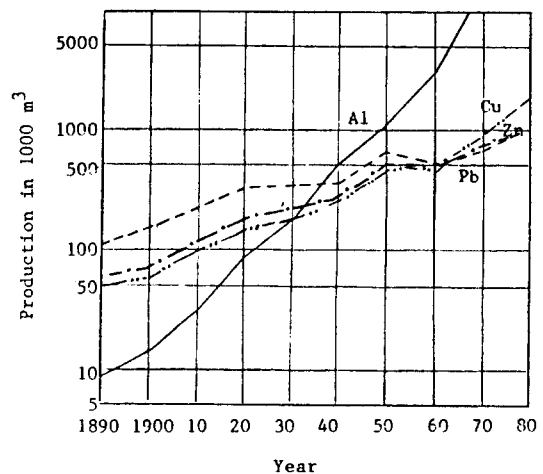


Fig. 1 World production of some nonferrous metals

\* 정회원, 대우조선(주) 기술연구소 재료/용접 연구실

2. 점용접에 미치는 알루미늄의 재성질

2.1. 알루미늄 합금의 물리적 성질

Fig. 2에는 점용접 방법을 간략히 나타내었다.

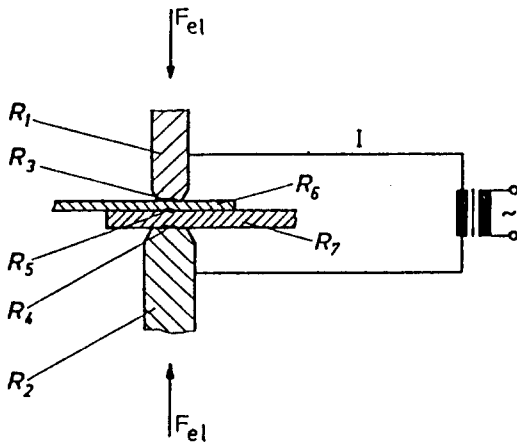


Fig. 2 Principle of resistance spot welding

이와 같은 용접부에 전류가 흐르면 다음의 Joule법칙에 따라 각 저항 부위에는 열이 발생한다.

$$Q = \int_0^t I(t) R(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

Q : 총발생 열량      I(t) : 용접전류  
t : 용접시간          R(t) : 전기 저항

알루미늄 합금의 전기 전도도는 각 화학 성분이나 열처리 방법에 따라 달라지나 일반적으로 약 16-35m/Ωmm를 가지며, steel의 전도도는 이보다 낮은 약 9.3m/Ωmm 정도 나타낸다. 그러므로 Joule법칙에 따라 같은 용접 전류에서 발생하는 열량은 알루미늄 합금이 Steel에 비해 매우 적게 된다. 한편 용접 nugget의 크기는 입열량과 용접

봉 및 알루미늄 모재를 통한 열방출량의 평형관계에 따라 결정된다. 알루미늄의 열전도도는 1.2-2.2W/cm K로 steel에 비해 약 3배 정도 크며, 이러한 높은 열전도도 때문에 용접시 발생열은 알루미늄 모재를 통해 쉽게 방출되어, 용접이 시작되면 짧은 시간내에 입열과 방열이 평형을 이루게 된다. 알루미늄의 용접시는 이러한 높은 전기전도도와 열전도도 때문에 알루미늄의 용융온도가 steel에 비해 매우 낮음에도 불구하고 약 2-3배 정도의 높은 전류를 짧은 시간내에 흘려야만 한다<sup>2)</sup>. Table 1에는 알루미늄 합금과 steel의 물리적 성질을 간단히 나타내었다.

2.2. 알루미늄 합금의 화학적 성질

알루미늄 합금의 우수한 내식성은 표면에 형성된 치밀한 알루미늄 산화 피막에 기인한다. 그러나 이 산화막은 전기적으로 비전도체 일뿐만 아니라, 용융점도 2050°C 정도로 높아 점용접에 매우 나쁜 영향을 미친다.

Fig. 3은 저항 용접부중 용접봉과 모재 표면과의 접촉부를 도식적으로 나타낸 것이다<sup>3)</sup>. 용접봉으로 산화 피막이 덮인 알루미늄 모재를 압착시키면, 산화막의 일부가 깨어지며, 순수 금속 접촉 부위로 전류가 흐른다. 산화피막이 두꺼울 수록 전류가 흐를 수 있는 부위는 좁으며, 용접전류는 접촉 부위로만 집중적으로 흐르게 된다. 알루미늄 합금의 경우 실접촉면적은 외관상 접촉면적의 10-15%정도 밖에 되지 않으며, 용접전류도 높아 용접시 용접봉과의 접촉부위는 높은 열응력을 받을 뿐만 아니라, 심한 경우 부분적으로 용융할 수도 있다<sup>4)</sup>. 알루미늄 합금의 점용접시 짧은 용접봉 수명은 이러한 알루미늄 산화피막에 의한 높은 열응력과 국부적인 용융현상 때문이다.

산화피막의 두께는 원칙적으로 모재의 보관상태에 직접 영향을 받으나, 화학성분에도 영향을 받

Table 1 Physical properties of steel and aluminiums

	밀도 (g/cm)	용점 (°C)	전기전도도 (m/Ωmm)	열전도도 (W/cmK)	열팽창 계수 (m/m K)
순수Al	2.7	660	35	2.2	2.4 · 10 <sup>-6</sup>
AlMg5	2.63	520 630	16.5	1.2	2.35 · 10 <sup>-6</sup>
AlMgSi1	2.7	600 640	31	1.8	2.3 · 10 <sup>-6</sup>
AlCuMg2	2.8	530 645	18.5	1.6	2.4 · 10 <sup>-6</sup>
C-Steel	7.85	1510	9.3	0.5	1.1 · 10 <sup>-6</sup>

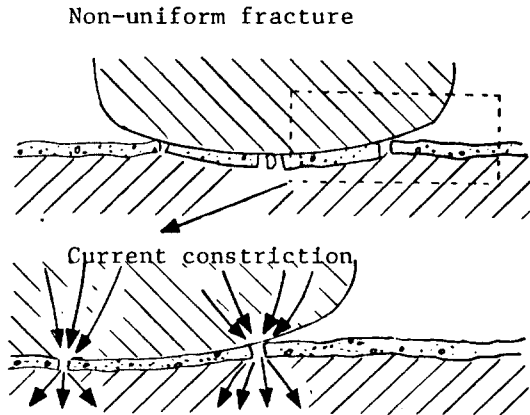


Fig. 3 Schematic morphology of contact surface of aluminium sheet

는다. 알루미늄 표면의 산화막을 기계적 방법으로 제거하면 짧은 시간내에 두께 약  $0.001\mu\text{m}$ 의 새로운 비정질  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 산화막이 형성된다. 건조한 상온하에서 산화막은 매우 천천히 성장하여 며칠이 지난후 최종 두께  $0.003\mu\text{m}$ 정도까지 성장한다. 그러나 습기가 많은 조건하에서는 비정질  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 위에 새로운 산화막이 형성된다. 이 산화막은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 혼합되어 있으며, 일부 기공도 포함되어 있다. 이 경우 기공을 통하여 산소가 계속 확산 될 수 있어 산화물은 계속 두꺼워지며, 최종 두께는  $0.01\text{--}0.005\mu\text{m}$ 정도에 이른다. 한편 알루미늄 합금중에 마그네슘(Mg) 이온이 포함된 경우 Mg은 Al보다 쉽게 산화막층을 통해 확산되며, 모재표면에  $\text{MgO}$ 를 형성한다. 따라서 Mg성분이 포함된 알루미늄의 경우 표면산화 피막은 Mg 성분을 포함하지 않은 합금보다 두꺼워지며, 이에 따라 용접봉의 수명도 짧게 된다<sup>5)</sup>.

### 3. 표면 전처리

알루미늄 합금판은 용접전 산화피막을 제거하기 위하여 표면 전처리를 행하여야 한다. 전처리 방법은 크게 기계적 방법과 화학적 방법으로 나눌 수 있다.

기계적 방법이란 용접될 표면을 적당한 연마제로 연마하거나, 강재 솔을 이용하여 표면의 산화막을 제거하는 방법이다. 조그만 부위는 수동으로 연마하며, 넓은 판은 회전식의 기계술을 이용한다. 이 방법은 별도의 장소가 필요없어 간편하나,

처리후 표면이 비교적 거칠어지기 때문에 용접봉 수명에는 큰 영향을 주지 않는다. 연마가 끝나면 모재표면에 묻어 있는 연마제를 세척등의 방법으로 제거하여야 한다. 화학적 방법이란 NaOH 혹은  $\text{HNO}_3$  등의 화학용액을 이용하여 산화막을 녹여내는 방법을 말한다. 이 방법은 세척, 산세처리(Pickling), 세척, 부동태 처리(Passivation), 세척 및 건조의 순으로 진행된다. 각 산세처리 용액에 따라 적정처리시간이 있으므로 용액이 변하면 사전에 시험을 통해 적정시간을 찾아야 한다. Table 2에는 화학적 방법에 주로 사용되고 있는 화학용액을 나타내었으며, Fig. 4에는 이러한 방법에 의해 처리된 알루미늄판의 표면 저항을 나타내었다<sup>6)</sup>. 최종 세척후에는 빠른 시간안에 표면을 건조시켜야만 표면저항을 증가시키는 얼룩의 형성을 방지할 수 있다. 가장 많이 이용되는 건조방법은 Methanol에 담근후 따뜻한 공기로 건조시키는 것이다.

전처리후 표면 품질 상태는 표면 접촉저항을 측정함으로써 판정한다<sup>7)</sup>.

알루미늄은 산소와의 친화력이 크기 때문에 순수 알루미늄이 대기중에 노출되면 수초내에 새로운 산화피막이 생기게 된다. Fig. 5에는 전처리후 유지시간에 따른 접촉저항의 변화를 나타내었다. 접촉저항은 최초에는 급격히 증가하다가 시간이 지남에 따라 그 증가 속도는 감소하게 된다<sup>8)</sup>.

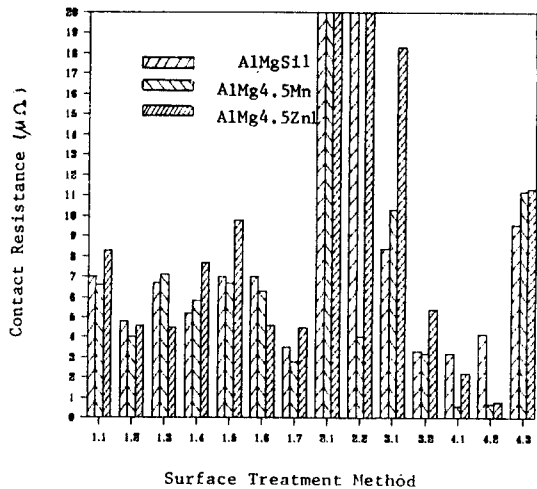


Fig. 4 Contact resistance of aluminium sheets depending on chemical surface treatment (see Table 2)

Table 2 Various chemical surface treatments for aluminium alloy

화학성분	조 건	방 법				비고
NaOH	조 성 온 도 시 간	1.1	1.2	1.3	1.4	G-AlSi 나 G-AlSiMg 에는 적용 안됨
		50g/l 상온 2분	50g/l 60℃ 1분	50g/l 60℃ 2분	200g/l 상온 1분	
	조 성 온 도 시 간	1.5	1.6	1.7		
		200g/l 상온 2분	200g/l 60℃ 1분	200g/l 60℃ 2분		
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaF	조 성 온 도 시 간	2.1	2.2			Cu와 Si 성분이 1% 인 합금에 적용
		75g/l 20g/l 50℃ 30초	75g/l 20g/l 50℃ 2분			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (95%) +NaF	조 성 온 도 시 간	3.1	3.2			
		100g/l 15g/l 상온 4분	100g/l 50g/l 상온 4분			
HNO <sub>3</sub> (66%) +HF (40%)	조 성 온 도 시 간	4.1	4.2	4.3		
		1050g/l 280g/l 상온 8초	1350g/l 23g/l 상온 50초	91g/l 0.5g/l 상온 5.5분		

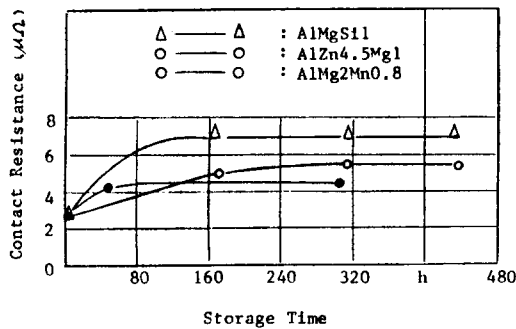


Fig. 5 Influence of storage time after surface treatment on contact resistance

Fig. 6은 전처리 방법에 따른 용접봉의 수명을 나타낸 것이다. 용접봉 수명이란 한쌍의 용접봉으로 용접품질이 일정기준을 벗어나지 않을 때까지 용접이 가능한 용접부 회수를 말한다. 용접품질의 판단 기준은 여러가지가 있으나, nugget의 크기 및 tensile shearing(전단) 강도를 기준으로 하는 방법과 용접부 표면의 손상상태를 기준으로 하는 방법이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 자동차

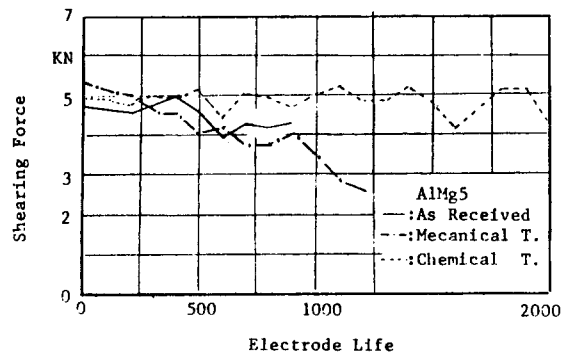


Fig. 6 Effect of surface treatments on electrode tip life

혹은 일반 구조용에서는 전자를 기준으로 하고 있으나, 항공기 분야등에서는 후자를 기준으로 삼고 있다. 이 그림에서의 용접봉 수명은 전단 강도를 기준으로 판단하였으며, 화학적 전처리 방법의 경우 용접봉 수명이 가장 길다. 기계적 처리 방법은 처리하지 않은 결과에 비해 큰 수명의 증가를 보이지 않는다. 기계적 전처리 방법이 낮은 용접봉 수명은 표면의 거칠기와 불균일한 저항값 때문이

다.

#### 4. 용접봉

점용접시 용접봉은 용접가압력과 용접전류를 용접부에 전달하는 역할을 한다. 따라서 용접봉은 용접 가압력을 견딜 수 있도록 충분한 강도를 가져야 하며, 용접부에 의한 전기 손실을 막기 위해 전기전도성도 우수하여야 한다. 용접봉으로 가장 많이 사용되고 있는 재료는 구리합금이다. Table 3에는 용접봉의 주요재질 및 그들의 성질을 나타내었다<sup>8)</sup>.

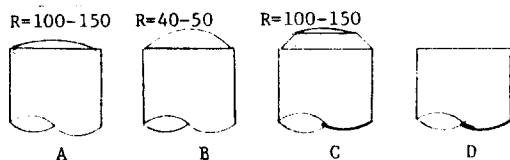
**Table 3 Important properties for electrode materials**

용접봉재료	전기전도도 (m/Ωmm)	경도 (HB)	연화온도 (°C)
CuCd	48	95	250
CuCr	46	140	475
CuCrZr	45	140	500
CuCoBe	26	180	475
Cu + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	130	650
CuAg	40	140	400

각 재질에 따른 용접봉의 수명은 용접부 품질기준에 따라 달라진다. 용접부의 강도 뿐만 아니라, 용접부 표면의 품질이 중요한 경우에는 CuCd나 CuAg와 같은 우수한 전기전도도를 가진 재료가 추천된다. 그러나 단순히 용접부 nugget 크기 혹은 용접부 강도가 중요할 때는 용접부 끝단 부위의 변형이 적게 일어나고 강도가 높은 CuCrZr이 추천된다.

Fig. 7에는 용접봉 끝단부위 형상을 나타내었다. 용접봉 형상도 앞에서 설명한 바와 같이 용접부 품질 기준에 따라 결정된다. 즉 표면상태가 중요할 때는 A와 같은 형상이 추천되며, 용접부 강도가 중요할 경우는 C의 형상이 추천된다<sup>9)</sup>.

용접봉의 재질 및 형상이 용접봉 수명에 미치는 영향에 대하여 지금까지 많은 보고들이 발표되어



**Fig. 7 Typical electrode configurations**

있지만, 각 경우마다 그 결과들이 다른 것은 바로 이러한 품질기준이 각기 다르기 때문이다<sup>10)</sup>.

#### 5. 사용전류의 형태

용접기로는 직류, 교류 용접기가 주로 사용되고 있으며, 고급품질의 경우 주파수를 1/3로 줄인 교류도 사용되고 있다. 교류 용접기는 장비 가격이 싸기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 이 용접기는 삼상 전류중 단상 혹은 두상만 사용하기 때문에 1차측 전력 공급에 불균형을 가져온다. 또한 2차측에서도 유도 기전력이 매우 많이 발생되어 전력의 손실을 유발한다. 유도 기전력에 의한 2차측의 손실은 정류기를 이용한 단상 직류 용접기를 사용하면 줄일 수 있다. 삼상 직류 용접기는 유도 기전력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 1차측의 전원 불균형도 줄일 수 있다는 장점이 있다.

일반적으로 직류 용접기를 사용한 경우의 용접부가 교류 용접기를 사용한 경우보다 품질이 안정된 것으로 보고되고 있다<sup>11)12)</sup>. 그 이유는 직류 용접에서는 교류에서 나타나는 skin effect가 없어져서 전류가 용접부에 균일하게 흐르기 때문이다. 또한 교류의 경우 같은 유효 전류(I<sub>e</sub>)에 비하여 순간 최고 전류(I<sub>p</sub>)가 직류의 경우보다 높기 때문에 용접시 순간적인 과열현상이 나타나 용융물이 용접부틈으로 빠져 나오는 expulsion현상이 발생하기 쉽다.

Fig. 8은 두께가 다른 전도체에서 재료에 따른 skin effect를 보여주고 있다<sup>13)</sup>. 이 그림에서 보면 알루미늄의 경우 반지름 15mm까지는 skin effect가 전류밀도 분포에 전혀 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 steel의 경우 반지름 10mm에서 전류밀도가 표면부위에 집중되어 있음을 알 수 있다. 즉 교류 용접시 steel에서는 skin effect가 용접품질에 영향을 줄 수 있으나, 알루미늄 용접에는 큰 영향을 미치지 않는다.

용접봉 수명은 용접기 종류에 직접적인 영향을 받는다. 교류 용접 경우 양쪽 용접봉이 균일하게 소모되나 직류 용접 경우 (+)극 용접봉이 (-)극보다 빨리 소모된다. Fig. 9는 직류 용접기를 이용하여 AlMg3합금을 100번 용접한 경우 용접봉의 소모상태를 보여주고 있다. 이 그림에서 (+)용접봉이 (-)용접봉 보다 마모가 심하다는 것을 알 수 있다.

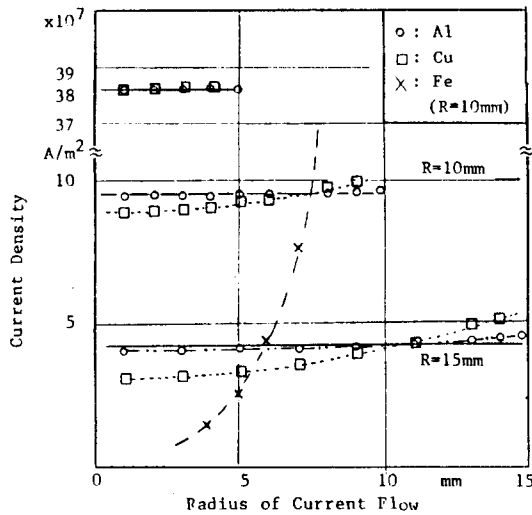


Fig. 8 Skin effect depending on materials and radii of current flow



(a) Positive (b) Negative

Fig. 9 Surface damage of electrodes depending on Polarity

직류 용접시(+)극에서 용접봉 소모가 빠른 것은 두 상이한 금속의 접촉시 나타나는 Peltier 효과 때문으로 알려졌다<sup>14)</sup>. Peltier효과란 상이한 두 금속의 접촉부에 전류를 흘리면 한쪽 접촉면에서는 Joule 열과 함께 추가적인 열이 발생하며, 다른쪽 면에서는 추가적인 열이 감소하게 되는 현상을 말한다. 이에 따라 알루미늄 용접시에는 (+)극 쪽에는 추가적인 열이 발생하며, 반대로 (-)쪽에서는 추가적인 열이 감소하게 된다. 그러나 알루미늄 합금의 경우 구리와 알루미늄 사이의 Peltier효과가 크게 나타나지 않기 때문에 오히려 금속 산화물과 금속사이에 나타나는 thermal electric 효과가 훨씬 큰 영향을 미친다<sup>13)</sup>.

## 6. 용접조건 선택

용접조건은 충분한 nugget size가 얻어지는 등

시에 explosion현상이 나타나지 않게 선택되어야 한다. 두께에 따른 nugget size기준은 설계기준에 따라 다르나, 일반적으로  $\sqrt{5t}$ (여기서 t는 모재두께) 이상이어야 한다.

### 6.1. 용접가압력

용접가압력과 용접시간 및 용접전류는 상호 보완적인 관계가 있다. 용접 가압력이 높아지면 용접부 접촉 저항이 낮아지며 이에 따라 충분한 nugget size를 얻기 위한 용접 전류나 시간을 증가시켜야 한다.

가압력을 높이면 용접봉 표면부 발생열을 줄일 수 있기 때문에 용접봉 소모를 줄일 수 있으며, 용접부 기공, 균열 등의 내부결함도 줄일 수 있다. 그러나 용접표면에 깊은 용접봉 자국이 남게 되는 단점이 있다. 이와 반대로 가압력이 낮게 되면 용접전류는 낮출 수 있으나, 용접결함과 explosion현상이 발생하기 쉽다. 적정 용접 가압력은 알루미늄 합금의 종류에 따라 달라진다. 일반적으로 강도가 높은 합금이 낮은 합금보다 높은 가압력이 필요하다. 요구되는 가압력은 12-19F 정도이다. 여기서 F는 모재의 강도를 N/mm<sup>2</sup>으로 나타낸 값을 말한다.

Fig. 10에는 용접시간에 따른 대표적인 가압력 program을 나타내었다. (a)는 일반적인 가압력 변화를 보여주며, (b)와 (c)는 용접전 혹은 용접 후 가압력을 증가시키는 방법이다. AlCuMg2나 AlZn4.5Mg1 등의 고강도 합금 용접시에는 용접 부내에 고온 균열과 기공등의 내부결함이 쉽게 발생한다. 이 경우 (b)나 (c)의 가압력 program을 이용하면 내부 결함을 줄일 수 있다. 용접 후 가압력을 증가시키는 경우 가압력은 용접이 끝나는 동시에 증가하여야 한다. 그 이유는 용접이 끝난 후 매우 짧은 시간내에 용접부 응고가 일어나 가압시간이 늦게 되면 용접부 결함방지에 전혀 도움을 주지 못하기 때문이다<sup>2)</sup>. 용접전 가압력을 올리면 산화 피막이 부서져 제거되기 때문에 모재와 용접봉사이의 접촉 저항이 낮아져 용접봉의 표면 손상을 줄일 수 있다. 그러나 모재의 표면 전처리가 잘 되었을 경우는 전혀 효과를 주지 못한다.

항공기 분야에서는 용접품질을 향상시키기 위하여 대부분의 경우 가압력 program을 이용하고 있다. 용접후 가압력의 크기는 일반적으로 용접시 가압력의 약 2배 이상이 요구된다.

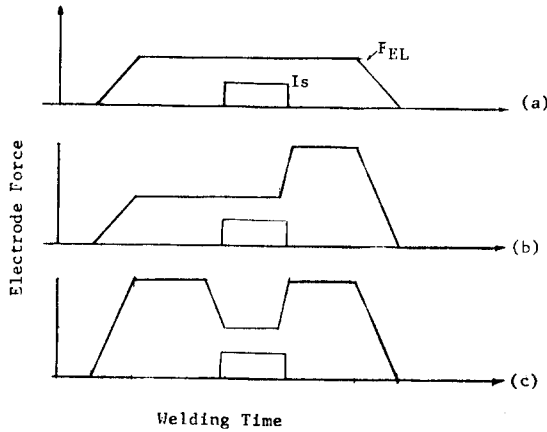


Fig. 10 Typical electrode force program for aluminium spot welding

6.2. 용접전류 및 시간

Nugget size를 증가시키기 위해서는 용접전류를 증가시키는 방법과 용접시간을 증가시키는 방법이 있다. 알루미늄 합금은 열전도도가 우수하기 때문에 용접도중 짧은 시간내에 입열량과 방출열량 사이에 평형이 이루어진다. 따라서 용접시간이 어느 정도 이상되면 용접시간이 길어져도 nugget size는 더 이상 증가하지 않는다.

Fig. 11에는 용접시간에 따른 전단 강도의 변화를 나타내었다. 이 그림에서 보면 AlZnMg 합금의 경우 용접시간이 200msec, AlMgMn 합금경우 240msec 이상에서는 용접시간이 증가하여도 전단 강도의 증가를 보이지 않고 있다. 따라서 nugget size를 증가시키기 위해서는 용접시간을 증가시키는 것보다 용접전류를 증가시키는 것이 더욱 효과적이다. 그러나 높은 전류의 사용은 explosion발

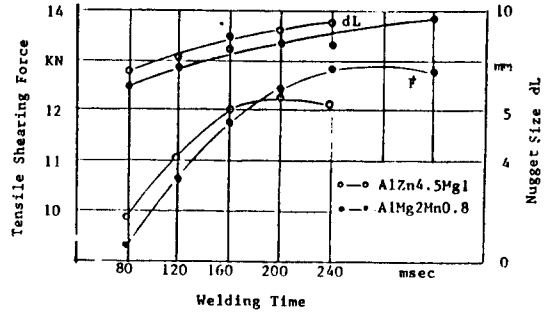


Fig. 11 Effect of welding time on tensile shearing strength of aluminium alloys

생을 유도할 수 있다.

Table 4에는 AlMg3 합금의 두께에 따른 적정 용접조건 기준을 나타내었다<sup>9)</sup>.

합금의 종류가 달라지면 전기전도도 및 인장강도가 달라지기 때문에 가압력이나 용접 전류를 일부 변경하여야 한다. 변경조건은 다음 Table 5를 기준으로 한다<sup>15)</sup>. 일반적으로 전기 전도도가 높은 합금의 경우 용접 전류나 용접시간을 기준 용접조건보다 증가시켜야 하며, 모재강도가 높은 합금의 경우 가압력도 증가시켜야 한다.

Table 5 Recommended welding conditions depending on electric conductivity of aluminium alloys

두께 $t_1 < t_2$ (mm)	전도도 (m/mmΩ)	가압력	시간 (msec)
AlMgSi 1	24~31	12F~17F	40 $t_1$
AlMg2Mn 0.8	27		
AlMg3	20~25		
AlMg4.5 Mn	17	14F~19F	40 $t_1$ + 20
AlZn4.5 Mg1	18~23		

\* 1) F는 재료의 인장강도 (N/mm<sup>2</sup>)

Table 4 Typical conditions for resistance spot welding of AlMg3 in direct current welding machine

두께 (mm)	0.35	0.5	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
용접봉 지름(mm)	16	16	16	16	16	20	20	20	25	25
용접부끝반경(mm)	75	75	75	75	100	100	100	100	100	150
용접가압력(KN)	1.5	1.8	2.2	3.0	3.5	4.0	5.0	6.5	8.0	10.0
전류(KA)	20	22	27	29	30	32	34	38	41	47
시간(msec)	40	40	60	60	80	100	130	160	180	210
Nugget Size(mm)	3.0	3.5	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	8.5	9.5

7. 점용접 구조물 설계

7.1. 용접부 정적 강도

용접부 정적 강도에는 전단강도(Tensile Shear Strength), Cross 인장강도(Cross tensile Strength) 및 비틀림 강도(Torsion Strength) 등이 있으나, 일반적으로 용접부 강도라 하면 전단 강도를 말한다.

용접부의 전단강도는 nugget size와 모재의 인장강도가 증가할 수록 증가한다. 이때 냉간가공 혹은 석출 경화처리로 인장강도를 높인 합금은 annealing처리때의 인장 강도를 간주한다. 그 이유는 용접열에 의해 가공 경화나 석출 경화에 의한 강도 증가 효과가 감소하기 때문이다. 석출 경화 합금은 용접 직후에는 전단강도가 매우 낮으나, 용접후 시간이 지나면 자연시효가 진행되어 강도가 다시 상승한다. 예를 들어 AlZn4.5Mg1 합금의 경우는 용접후 3개월이 지나면 최고 강도가 얻어진다.

Table 6에는 각 합금의 강도 및 두께에 따른 요구 전단강도를 나타내었다.

Table 6 Minimum shear strength of resistance spot welds in aluminium alloys

두께 $t_1 \leq t_2$ mm	Nugget Size	인장강도 분류*					
		F18 F21	F22 F24	F25 F28	F30 F35		
0.8	4.5	0.9	1.1	1.2	1.4		
1	5	1.2	1.5	1.7	2		
1.25	5.5	1.7	2	2.3	2.8		
1.5	6	2.2	2.7	3	3.6		
2	7	2.6	3.1	3.5	4.3		
2.5	8	3.4	4.2	4.7	5.7		
3	8.5	4.4	5.4	6.1	7.3		

\* 인장강도 분류 F18은 모재인장강도 180N/mm<sup>2</sup>급임

7.2. 용접부 피로강도

점 용접부의 피로 강도는 nugget 가장자리의 응력 집중 현상 때문에 정적 강도에 비해 매우 낮은 값을 나타낸다. 그림 12는 FEM계산에 의한 응력 집중 현상을 나타낸 것이다<sup>16)</sup>. 알루미늄 합금 용접부의 피로 강도는 합금 종류에 따라 다르

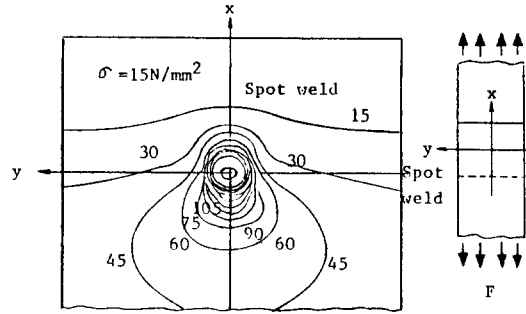


Fig. 12 Stress concentration at spot weld joint predicted by finite element method

나 일반적으로 전단강도의 10-20% 정도이다.

피로강도에 영향을 주는 요소는 모재 재질 뿐만 아니라, 모재두께, nugget간의 거리 등도 들 수 있다. 같은 nugget size에서는 모재가 두꺼울 수록 피로강도가 높아지며, nugget size간의 거리가 줄어들 수록 높아진다. Fig. 13에는 알루미늄 재질, 모재두께 및 nugget size에 따른 피로강도를 나타내었다. 이 그림에서 보면 nugget size가 같은 경우 피로강도는 모재 재질에 보다는 모재 두께에 더욱 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Nugget 내부의 기공 등의 용접 불량은 이들이 nugget 내부 1/3위치에 있을 경우 피로강도에 영향을 주지 않는다. 그 이유는 fatigue crack이 항상 nugget 가장자리 부위에서 일차적으로 발생하

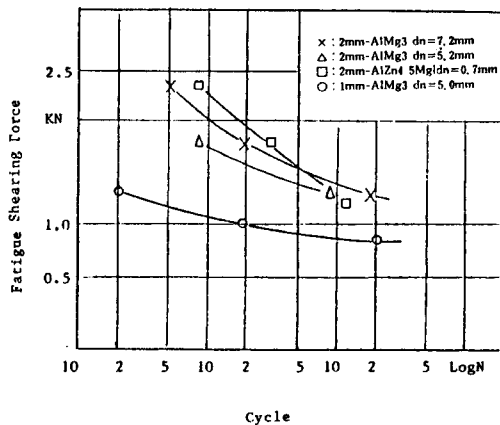


Fig. 13 Fatigue strength of spot weld joint depending on nugget size and thickness of aluminium sheets



기 때문이다. Fig. 14은 피로 시험시 파손된 용접부의 단면을 나타낸 것으로 피로 crack은 용접내부 결함과 상관없이 nugget 가장자리에서 발생하였다.

점 용접부의 인장 잔류 응력은 다른 용접방법에 시와 마찬가지로 피로 강도를 낮추는 역할을 한다. 특히 문제가 되는 부위는 응력이 집중되는 nugget부 가장자리이다. 따라서 만약 이 부분의 인장 잔류 응력을 제거시키면 피로 강도를 높일 수 있다<sup>17),18)</sup>. 잔류 응력을 제거시키는 방법으로는 용접후 가장 자리 부위를 압축 가공하거나, 혹은 용접봉에 steel tube를 부착시켜 용접시 인장잔류 응력의 발생을 용접 도중에 억제시키는 방법이 보고되고 있다.

항공기 분야에서는 전단 강도 및 피로강도를 향상시키기 위해 용접후 화학 접착제를 사용하여 모



Fig. 14 Typical fatigue failure of spot weld joint

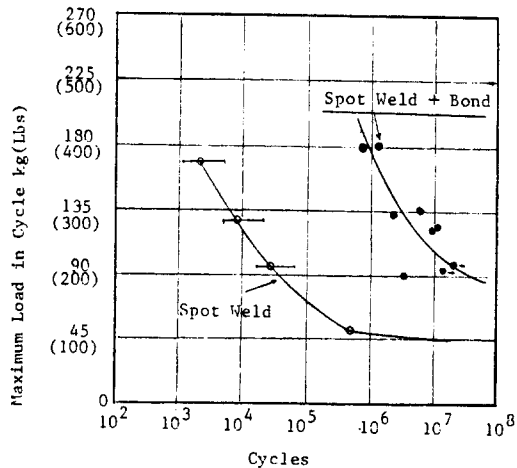


Fig. 15 Fatigue strength of spot weld aluminium joint and bonded spot weld joint using vinyl plastisol

재의 겹친 부분을 접착시키기도 한다. Fig. 15는 화학 접착제를 사용한 용접부와 사용하지 않은 용접부의 피로강도를 비교한 것이다. 이 그림에서 화학접착제를 사용한 경우의 피로강도는 단순 점용접 부위에 비해 약 2배 정도 높게 나타났다<sup>19)</sup>.

### 7.3. 용접부 설계

#### 7.3.1. 용접부 형태

Fig. 16은 점용접을 이용한 구조물 제작시 대표적인 용접부 배열 형태를 보여주며, Table 7에는 각 용접부간의 거리 및 모재 끝단부 거리, 모재 폭 등의 기준을 나타내었다. 특히 알루미늄 용접시에는 전기 전도도가 우수하기 때문에 nugget와 nugget 사이의 최소 거리가 매우 중요하다. 그 이유는 nugget 사이 거리가 작으면 용접진류가

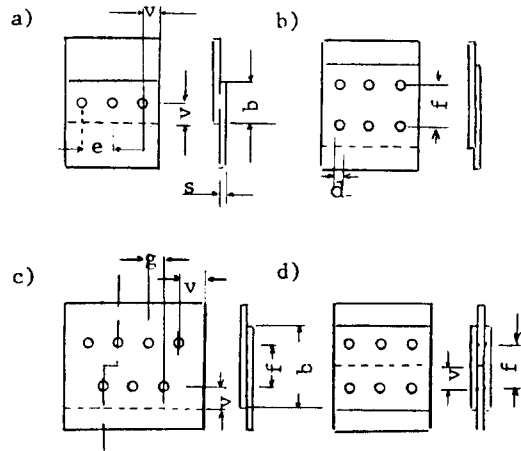


Fig. 16 Examples for spot weld joint ;  
 $e=5d, v=1, 25d, f=e$   
 $b=2v, g=e/2$

Table 7 Recommended minimum spot weld spacing, edge distance and overlap for aluminium sheet (unit : mm)

두께	Nugget Size (d)	용접부간격	
		끝단부 여유 (v)	(f)
0.8	4.5	5.5-4.5	30-35
1	5	6.5-5	30-40
1.25	5.5	7 -5.5	35-45
1.5	6	7.5-6	35-50
2	7	9 -7	40-55
2.5	8	10 -8	50-65
3	8.5	11 -8.5	50-70

기용접된 부위로 분산되면서 홀러 두번째 용접부 부터는 nugget 크기가 첫번째 용접부 보다 작아 지기 때문이다.

7.3.2. 용접설계시 허용강도

용접설계시 허용강도(Fe)는 Table 6에 나타낸 용접부 최소강도(Fm)의 50%정도이다. 이와 같이 Fe가 낮은 이유는 전단 강도 시험에서 얻는 강도가 파단시 최고 강도를 나타내는데 비해 설계 시에는 변형이 일어나기 시작하는 강도를 기준으로 해야 하기 때문이다. 즉 이러한 관계는 일반구조물의 설계시 설계강도는 재료의 인장 강도보다는 소성 변형이 일어나기 시작하는 항복강도를 기준으로 한다는 개념과 동일한 것이다.

구조물에서 용접부가 받는 전체 하중을 F라 하고 용접 부수를 n이라 하면, 한개의 용접부가 받는 하중(Fp)은 다음과 같이 계산된다<sup>20)</sup>.

$$Fp = \frac{F}{n \cdot V \cdot W} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 V는 용접품질 검사 인자, W는 용접방법 인자를 각각 나타낸다.

Table 8과 Table 9에는 이들 V와 W의 결정 방법을 나타내었다.

한편 용접부 구조물 허용강도(Fz)는 Fe와 용접부 구조물의 안전 인자(S)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$Fz = \frac{Fe}{S} = \frac{Fm \cdot 0.5}{S} \dots\dots\dots (3)$$

Table 10에는 안전 인자의 결정 방법을 나타내었다.

식(2)와 (3)에 의해 구조물에서의 모재두께 및 이에 따른 nugget 크기, 용접부수는 다음식을 만족할 수 있도록 설계 되어야 한다.

$$Fp < Fz \dots\dots\dots (4)$$

Table 8 Welding quality factor V

조 건	V
최초 용접조건 설정 후 용접도중 용접조건을 계속 추적하는 경우	1.00
최초 용접조건 설정 후 용접도중 가끔 용접조건을 확인하는 경우	0.75
최초 용접 조건 설정 후 계속 용접하는 경우	0.50

Table 9 Welding process factor W

조 건	W
· 고정 용접기로 두개의 용접봉을 사용하여 용접하는 경우	1.0
· 이동식 용접기로 두개의 용접봉을 사용하여 용접하는 경우	0.9
· 한 변압기로 두개의 용접부를 동시에 용접하는 경우	0.9
· 한쪽 용접봉만 사용하여 용접하는 경우	0.8
· 3개나 4개의 철판을 동시에 용접하는 경우	<0.8

Table 10 Safety factor S

안 전 조 건	S
A : 용접부의 파손이 직접 인명 손실과 관계있는 경우	1.8
B : 용접부의 파손이 구조물의 작동에 직접적인 영향을 주는 경우	1.5
C : 용접부의 파손이 구조물의 작동에 조급밖에 영향을 주지 않는 경우	1.2

이러한 계산방법은 용접부가 전단하중을 받을 경우에만 적용할 수 있다. 만약 용접부가 cross 인장 하중을 받게 되면, 이때 허용되는 구조물 설계 하중(Fzc)은 다음과 같다.

$$Fzc < 0.33Fz \dots\dots\dots (5)$$

7.3.2. 실제 용접부 설계에

본고에서는 두께 2mm의 AlMg3 판을 이용하여 점 용접방법으로 기차 객차의 외판을 제작할 경우 한줄의 점 용접부로 제작이 가능한 최대 외판 용력을 계산해 보았다.

1) 조건

-사용된 AlMg3의 인장강도는 240N/mm<sup>2</sup>이다.

-용접부간의 거리는 Table 7에 따라 40mm로 한다.

-최초 용접조건은 시편을 이용하여 결정하며, 실 용접중 수시로 설정된 용접조건을 확인한다.

-용접기는 이동식 수동 용접기를 사용한다.

2) 계산

본 점용접부의 최소 요구 전단강도는 Table 6에 따라 3.1KN이다. 따라서 점 용접부의 허용강도는

$$Fe = Fm \times 0.5 = 3.1 \times 0.5 = 1.55KN \text{이다.}$$

한편 Table 10에 따라 기차의 외판의 안전도는 B급으로 간주하였다. 따라서 안전 Factor S를 고

려한 구조물의 설계허용 강도  $F_z$ 는

$$F_z = Fe/S = 1.55/1.5 = 1.03KN \text{이다.}$$

식(2)와 식(4) 및 Table 10을 이용하여  $F_z$ 를 한 개의 용접부가 받을 수 있는 하중으로 계산하면, 용접부 하중  $F$ 는

$$F = F_p \cdot V \cdot W = F_z \cdot V \cdot W = 1.03 \times 0.75 \times 0.9 = 0.695KN \text{이다.}$$

이를 다시 외관 응력( $\sigma$ )으로 계산하면

$$\sigma = \frac{F}{\text{두께} \times \text{용접부간의 거리}} = \frac{0.695}{2 \times 40} = 8.7 \text{ N/mm}^2 \text{이 된다.}$$

즉 기차 외관에 작용하는 응력이  $8.7N/mm^2$ 이하로 작용할 경우만 점용접 방법을 이용하여 외관을 제작할 수 있다.

### 8. 맺음말

본고에서는 알루미늄 점용접시의 용접품질 및 용접봉 수명에 미치는 요소와 점용접부 설계방법에 대하여 간략히 설명하였다. 점 용접방법은 알루미늄 뿐만 아니라 steel의 박판용접에도 많이 사용되고 있으며, 특히 최근 공장자동화에 맞추어 가장 쉽게 자동화 할 수 있는 용접 방법중의 하나이다. 그러나 아직까지는 용접 품질을 보증할 수 있는 비파괴 검사 방법이 없기 때문에 새로운 비파괴 검사 방법 개발 혹은 컴퓨터를 이용한 용접 품질 추적 방법에 대한 많은 연구가 요청된다. 한편 용접부 설계 관점에서는 조그만 단순 시편이 아닌 설계구조물을 이용한 용접강도 해석 방법에 대한 연구가 미약하므로 이에 대한 많은 연구도 요청되고 있다.

### 후 기

본고에서 해설한 용접부 기준은 독일규격을 기본으로 하였기 때문에 합금분류도 독일 DIN규격에 따랐다. Table 11에는 참고로 본고에서 취급된 합금을 KS규격과 비교 나타내었다.

**Table 11 Conversion table between DIN and KS specification for aluminium alloys**

DIN 규격	유사 KS 규격
AlMg5	5056
AlMg3	5154
AlMgSi1	6063
AlMg2Si0.8	"
AlMg4.5Mn	5083
AlZn4.5Mg1	7NO1
AlCuMg2	2024

### 참고문헌

- 1) Neue NE - und Leichtmetallegerungen, Sonderschau "Neue Werkstoffe" auf der METAV 86, Bundesministerium fuer Forschung und Technologie, (1986), pp 22
- 2) Dorn, L : Fuegen von Aluminiumwerkstoffen, Expert verlag, Band 114, (1983)
- 3) Patrick, E.P., J.R.Auhl and T.S.Sun : Understanding the processmechanisms is key to reliable resistance spot welding aluminium autobody components, SAE 840291, (1984)
- 4) Budailov, N.F. : Methods of increasing the durability of electrodes in the resistance spot welding of thin sheets of aluminium alloys, Weld. Prod., No. 2, (1980), pp 37/39.
- 5) Falkenstein, H.-P., H.Klock and K. Mechsner : Influence of surface resistance of body sheets in the alloy AlMg5, DVS-Berichte 70, (1981), pp.1/5
- 6) Eichhorn, F. and S. Singh : Oberflaechenbehandlung von Fuegeteilen aus Aluminiumwerkstoffen als Vorbereitung fuer das Widerstandspunktschweissen, Baender, Bleche, Rohre, No. 11, (1977), pp.499/504
- 7) Merkblatt DVS 2929, Widerstandsschweissen, Messen des Uebergangswiderstandes an Aluminium und Aluminumwerkstoffen, (1983)
- 8) DIN ISO 5182, Werkstoffe fuer Elektroden und Hifseinrichtungen fuer Widerstandsschweissenrichtungen.

- 9) Merkblatt DVS 2932, Widerstandspunkt- und -rollenahtschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen von 0.35 bis 3.5mm Einzeldicke, (1983)
- 10) Rivett, R.M. and S.A. Westgate : Resistance welding of aluminium alloys in mass production, Metal Const. Vol. 2, No. 12,(1980), pp. 78/86
- 11) Dilay, W., E.A. Rogala und E.J Zubinski : Resistance welding aluminium for automotive production, SAE paper 77030, (1977)
- 12) Eichhorn, F. and W. Langhardt : Einfluss des phasenangeschnitten Schweißstromes auf die Linsenausbildung beim Widerstandspunktschweißen fuer Blechdicke bis 1.0 mm, Schw. u. Schn., Vol. 22, No. 2, (1970), pp. 289/291
- 13) Han, Y.S. : Untersuchungen zum Anlegungsverhalten der Elektrode beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen, Dissertation, (1988), Braunschweig, W. Germany
- 14) Eichhorn, F., M. Emonts and B. Leuschen : Widerstandspunktschweißen mit Gleich und 50 Hz Wechselstrom, Blech, Rohre, Profile, No. 3, (1971), pp. 97/105
- 15) Merkblatt DVS 2923, Widerstandspunktschweißen von staelen und Aluminiumwerkstoffen in Schienenfahrzeugbau, (1986)
- 16) Hahn, O. and B. Wender : Finite Element Analyse einer auf Zug beanspruchten einschnittig ueberlappten Widerstandspunktschweissverbindung mit Hilfe unterschiedlicher Strukturmodelle, Schw. u. Schn., Vol. 35, No. 4, (1983), pp. 174/178
- 17) Welter, G. : Fatigue tests of spot welds, Improvement of their endurance limit by hydrostatic pressure, Wdg. J. Res. Suppl., (1948), pp. 285s/298s
- 18) Tumakov, S.F. : Increasing the endurance of resistance spot welded joints by local plastic compression of metal, Weld. Prod. No. 2, (1981), pp. 21/23
- 19) F.R. Hoch : Joining of Aluminium alloys 6009/6010, SAE 780396, (1978)
- 20) Merkblatt DVS 2902 Widerstanspunktschweißen von Staehlen bis 3mm Einzeldicke. teil 4