

전자기펄스용접에서 용접강도에 미치는 접합간격의 영향

김성욱*·천창근*·김숙환*

*포항산업과학연구원 용접센터

Effects of the Stand-off Distance on the Weld Strength in Magnetic Pulse Welding

Sungwook Kim*, Changkeun Chun* and Sookhwan Kim*

*Welding Research Center, RIST

*Corresponding author : sungwook@rist.re.kr

(Received April 21, 2008 ; Revised May 19, 2008 ; Accepted December 9, 2008)

Abstract

Although Magnetic Pulse Welding(MPW) is not a recently developed technique, it has gained the attention of the automotive industry. MPW has become an accepted welding process because it enables the joining of similar, and dissimilar materials, with a very short cycle time, without the need for filler metal and gases.

In this study, the effect of the stand-off distance on the weld strength has been investigated. The compressive strength of the MPW joints was evaluated using UTM. The interface of weld, IMC composition and morphology were studied by SEM and EDS.

It was concluded that the stand-off distance and the voltage are the main parameters influencing the strength of weld. In case of too high stand-off distance, it influenced harmful effect because of the resistance of deformation.

Key Words : Magnetic pulse welding, Stand-off distance, Weld strength, Compressive strength

1. 서 론

최근 대기오염 및 지구온난화에 대한 문제가 계속 제기됨에 따라 수송기기의 중량을 줄임으로써 에너지를 절감하여 이러한 문제를 해결하고자 하는 노력이 진행 중에 있다. 수송기기의 경량화는 기존의 소재를 알루미늄이나 마그네슘과 같은 경량소재로 대체함으로써 얻을 수 있다. 하지만 경량소재를 기존의 용융용접으로 적용 시 내부에 기공이나 균열과 같은 결함이 발생하여 철강 대비 동등한 수준의 용접성을 달성하기 힘들며, 특히 철강과 경량소재의 이종용접이 필요한 경우도 있어 이를 해결할 수 있는 용접공정이 절실하다.

이종소재의 소재를 용접하는 데 있어 한가지 문제점은 용접이 서로 다르다는 것이다. 따라서 소재를 용융시키지 않고 고상 상태로 접합하는 공정이 필요하다.

기존 접합 공정으로는 리벳팅, 브레이징, 마찰용접, 폭발용접 등을 들 수 있으며, 최근에는 마찰교반용접(FSW)이 개발되어 연구가 활발히 진행 중이다.

한편, 전자기펄스용접(Magnetic Pulse Welding, MPW)은 비록 최근에 개발된 용접공정은 아니지만 최근에는 자동차 산업에 있어 경량합금 및 이종금속 용접에의 적용으로 주목을 받고 있다¹⁻³⁾. 전자기펄스용접은 축적된 전기에너지를 전자기코일을 통하여 순간적으로 흘러줌으로써 코일 주변에 발생하는 전자기력의 상호 반발력에 의하여 용접하는 공정으로서, 폭발용접과 같은 원리로 플라잉(flying) 소재의 순간적인 충격을 야기한다. 이 때 발생하는 충격은 계면의 오염물을 제거하는 청정작용을 일으켜 접합하고자 하는 두 소재간의 순수 계면이 접촉, 결합됨으로써 금속결합이 이루어진다⁴⁾.

전자기펄스용접에 영향을 줄 수 있는 인자로 인가전

압, 방전시간, 코일형상 등의 장치적인 요소와 소재종류, 집합간격, 전기전도도, 강도, 연신율, 표면상태와 같은 소재적인 요소들을 들 수 있는데 이들 인자는 여러 연구자들에 의해 기초적인 관점에서 연구되어왔다(5-7).

한편, 본 연구에서는 실용적 접근의 관점에서 고강도 상용 합금을 이용하여 전자기펄스용접 시 집합간격이 용접강도에 미치는 영향에 대하여 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

전자기펄스용접을 위해 본 연구에서는 이스라엘 PULSAR에서 도입한 Fig. 1에서와 같은 전자기펄스용접장치(MPW 25/9)를 이용하여 용접을 실시하였다. 전자기펄스용접장치는 25kJ급으로, 최대 인가전압은 9kV, 최대 펄스전류는 500kA, 28kHz이다.

전자기펄스용접 시 인가전압에 따른 펄스파형은 Fig. 2에서와 같은 로고스키(Rogovski) 코일을 장착하여 오실로스코프를 이용하여 파악하였다. 로고스키 코일은 반경이 작은 코일을 토러스상의 절연물에 붙여 감아서 만든 것으로 피축정 전류에 의하여 만들어지는 자속의 변화를 검출하여 전류를 구한다. 본 연구에서는 전자기펄스용접 코일의 출력단에 로고스키 코일을 감았으며,

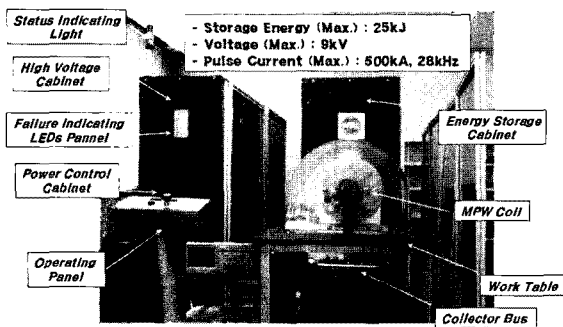


Fig. 1 Magnetic Pulse Welding Machine

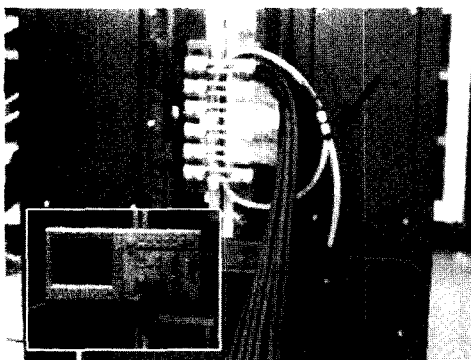


Fig. 2 Rogovski coil and oscilloscope for pulse detecting

오실로스코프에는 어댑터를 적용하여 연결하였다.

집합간격에 따른 용접강도 파악을 위해 외부소재는 외경 $\phi 25\text{mm}$, 두께 1.5mm의 알루미늄 A6063 파이프, 내부소재는 알루미늄 A6061 및 순동(C1221)을 사용하였으며, 내부소재의 형상은 Fig. 3에서와 같이 기능적으로 각각 A:내부지지부, B:용접구간, C:지그지지부로 이루어지도록 가공하였다. 집합간격(외부파이프와 내부파이프 간 간격)은 내부지지부의 직경을 $\phi 17\sim 19\text{mm}$ 로 가공하여 1.5~2.5 mm로 변화시켰다.

가공된 파이프는 Fig. 4에서와 같이 전자기펄스코일 내에 정확히 위치시켜 집합간격 별, 소재 조합별로 4.5~6.5kV의 인가전압 범위에서 용접을 실시하였다. Table 1은 본 실험변수를 정리한 것이다.

용접된 시편은 표면의 변화를 파악하기 위해 집합간격 및 인가전압별 변형폭을 3회 평균하여 측정하였으며, 용접강도는 만능시험기(UTM, 50ton)을 이용하여 5mm/min의 속도로 압축강도로 3회 평균하여 평가하였다.

Table 1 Welding parameters for MPW

Outer pipe	Inner pipe	Stand-off distance (mm)	Input voltage (kV)
Aluminum Alloy (A6063)	Aluminum Alloy (A6061)	1.5	4.5, 5, 5.5, 6
		2.0	4.5, 5, 5.5, 6
		2.5	4.5, 5, 5.5, 6
	Pure Copper (C1221)	1.5	4.5, 5, 5.5
		2.0	4.5, 5, 5.5
		2.5	4.5, 5, 5.5

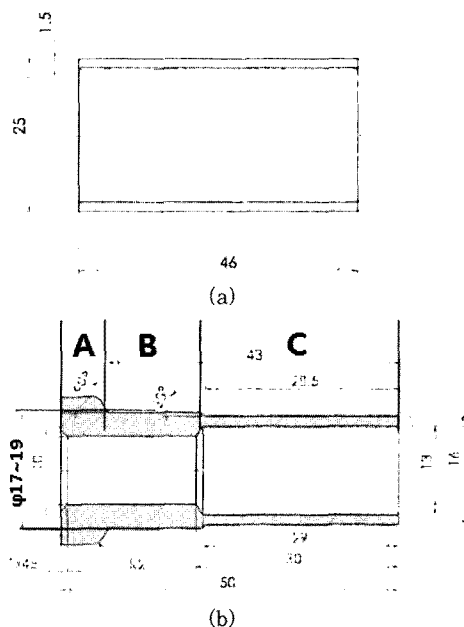


Fig 3 Specimens for MPW test (a) Outer pipe (b) Inner pipe

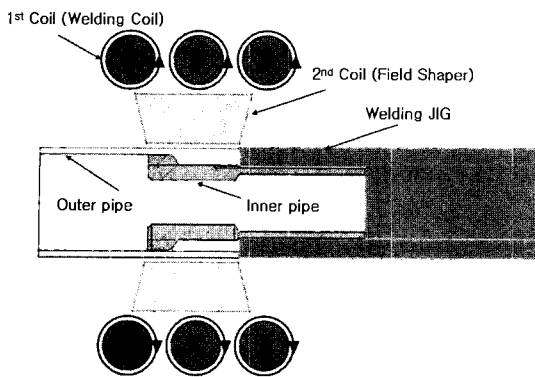


Fig 4 Initial state of MPW test

용접부는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 계면형상 및 금속간화합물을 관찰하였으며, EDS (Energy dispersive spectroscopy)로 계면 성분을 파악하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 펄스형상

용접 시 순간적인 전류는 Rogovski 코일로 유도되어 오실로스코프 상의 파형으로 관찰되었다.

Fig. 5는 각 펄스전압에 따른 펄스파형을 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 인가전압 4.5kV에서의 펄스파형을 나타낸 것으로 방전 시 감쇠진동으로 소멸한다.

이때 전류(I)는

$$I = V_{scope} \times K_{rog}$$

(V_{scope} : 오실로스코프 전압,

K_{rog} : Rogvski 코일의 integrator 고유상수)

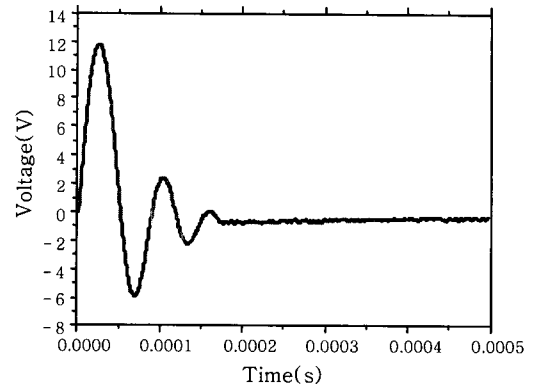
로부터 구할 수 있다.

Fig. 5(b)는 인가전압 2~8kV일 때 오실로스코프 상의 펄스파형을 나타낸 것으로 각 파형은 인가전압에 따라 피크전압이 증가하며, 최초피크에 이르는 시간은 거의 동일한 것으로 나타났다. Aizawa⁸⁾에 의하면 전자기펄스용접에서 최초피크에 이르는 시간동안 전자기유도에 의한 시편 간 충돌이 발생하게 되고 이 때 속력은 300m/s 이상인 것으로 측정되었다. 따라서 최초피크에 도달하는 주파수는 중요한 인자로 시간이 느릴 경우 용접이 되지 않고 변형만 발생할 수 있다.

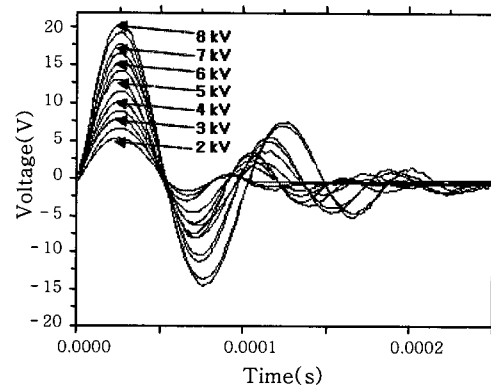
3.2 접합간격에 따른 용접결과

3.2.1 용접 변형부

전자기펄스용접에서 순간적인 전류방출에 의해 발생된 전자기력은 Fig. 6에서와 같이 외부의 파이프를 변

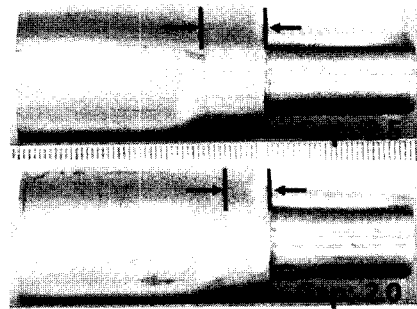


(a)

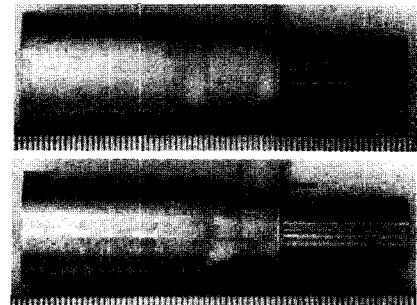


(b)

Fig. 5 Pulse wave of MPW (a) 4.5kV (b) 2~8kV)



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of deformation zone with stand-off distance (Input voltage: 5kV) (a) A6063-A6061 (b) A6063-C1221

형시킴, 접합간격에 따라 변형부의 폭이 변하는 것으로 나타났다. 동일한 인가전압이 가해졌을 때 나타나는 변형부의 폭은 접합간격이 큰 경우 더 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 알루미늄-알루미늄 동종 및 알루미늄-구리 이종 용접에서도 동일한 양상을 나타내었다.

파이프의 변형정도는 인가전압 및 접합간격에 따라 달라지는데 알루미늄-알루미늄 동종 및 알루미늄-구리 이종용접에의 영향에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

전압을 동일하게 인가 시 접합간격이 증가함에 따라 변형부의 폭은 증가하는 것으로 나타났다. 알루미늄 동종 간의 용접에서는 5.5kV에서 접합간격의 증가에 따른 변형부 폭의 증가가 두드러지게 나타났고, 6kV에서는 완만한 증가를 보였다. 이와 같은 결과는 접합간격이 좁을 경우에는 넓은 경우보다 외부에서 더 큰 에너지가 가해져야 동일한 충격이 발생한다는 것을 의미한다.

한편, Fig. 7(b)에서와 같이 알루미늄-구리 이종용접에서도 같은 인가전압에서 접합간격이 증가할수록 변형부 폭은 증가하였고, 같은 접합간격에서는 인가전압을 증가시킬수록 변형부의 폭이 증가하였다.

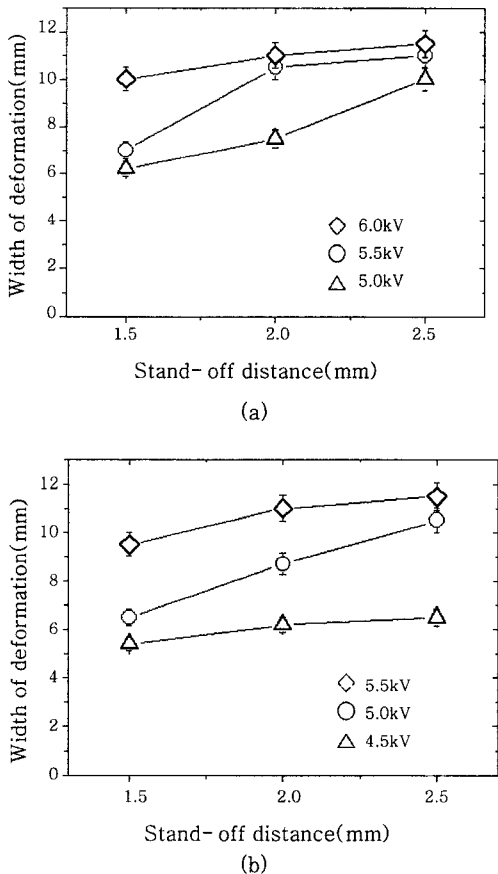


Fig. 7 Variation of length of deformation zone with stand-off distance (a) A6063-A6061 (b) A6063-C1221

3.2.2 압축강도시험 결과

만능시험기를 이용하여 용접부의 압축강도를 시험한 결과 Fig. 8에서와 같이 압축응력에 의해 외부파이프가 변형되는 경우와 외부파이프는 변형되지 않고 내부파이프만 밀려나는 크게 2종류로 관찰되었다.

외부파이프가 변형된 경우에 대하여 시편을 절단하여 단면을 확인한 결과 두 시편은 서로 계면 접합되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 압축시험을 통하여 용접부의 양호 및 불량을 판단할 수 있으며, 용접부가 양호한 경우에는 외부 응력에 대하여 외부 알루미늄 파이프가 변형되면서 최대값을 나타내었고, 용접이 불량한 경우에는 압축 도중 계면이 분리되면서 낮은 값을 얻었다.

그림 9는 접합간격 및 인가전압에 대한 최대 압축강도를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 접합간격이 좁은 1.5mm의 경우에는 충격을 줄 수 있는 이송거리가 짧아 양호한 용접이 될 수 없었고, 인가전압을 6kV로 증가시킨 경우 압축강도가 증가하였다. 한편, 5.5kV 및 6kV에서 전압을 동일하게 인가 시 접합간격에 따라 압축강도가 대체로 증가하다가 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 Fig. 9(b)의 알루미늄과 구리의 이종용접에서도 유사하게 나타났다. 이는 앞서 변형부 폭의 변화와는 차이를 나타내는데, Aizawa⁷⁾에 의하면 전자기펄스용접에서 충돌속도는 접합간격이 증가함에 따라 증가하다가 임계값 이후 다시 감소하는 경

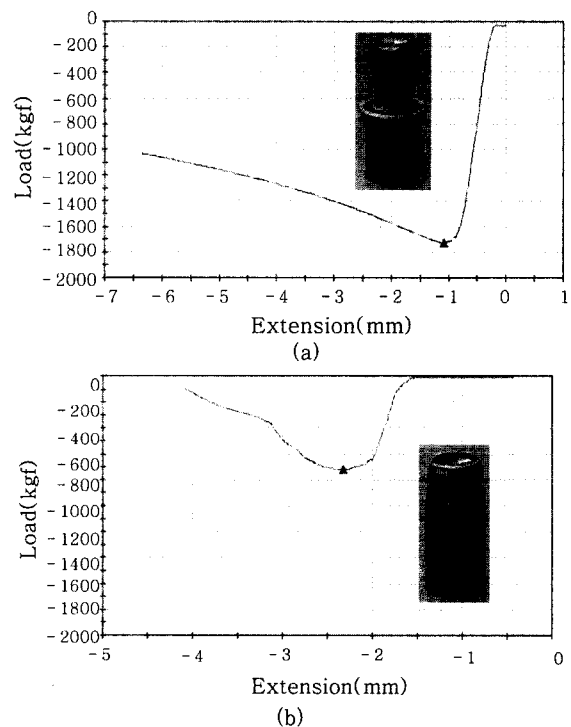


Fig. 8 Results of compression test for welding specimens (a)Good (b)Fault

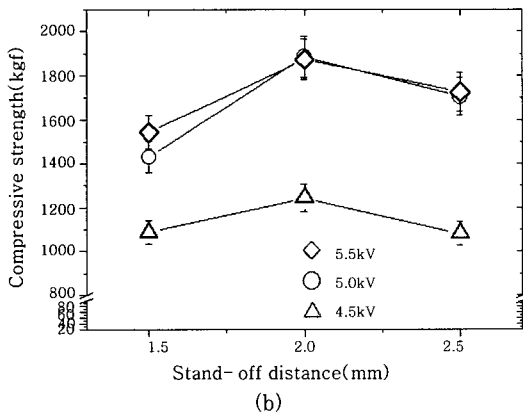
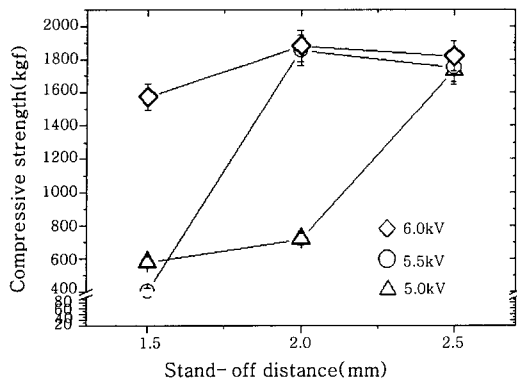


Fig. 9 Maximum compressive strength with stand-off distance (a) A6063-A6061 (b) A6063-C1221

향을 가지는 것으로 보고하였다. 본 실험에서도 이와 유사한 경향을 나타내는 것으로 파악되었는데, 이는 접합간격이 너무 좁은 경우에는 충분한 가속도를 얻을 수 없고, 접합간격이 너무 넓은 경우에는 시험편의 변형에 대한 저항력이 충돌속도를 감소시키는 역할을 한 것으로 보인다.

3.3 용접계면 관찰결과

3.3.1 동종소재(A6063-A6061)

Fig. 10은 동종의 알루미늄 소재에 대하여 전자기펄스 용접계면을 관찰한 결과이다.

용접부에서는 전자기펄스용접 시 볼 수 있는 전형적인 웨이브 형상을 관찰할 수 있으며, 일부에서는 계면을 따라 미접합부가 일부 남아 있는 것을 볼 수 있다. 계면에서의 제 2상 형성유무를 파악하기 위해 EDS (Energy dispersive spectroscopy) 분석을 실시한 결과 특이한 상 형성은 없는 것으로 확인되었다.

3.3.2 이종소재(A6063-C1221)

Fig. 11은 이종소재인 알루미늄과 구리에 대한 전자

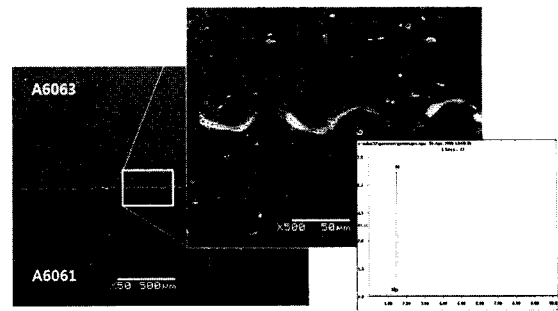


Fig. 10 Magnetic pulse welded interface of A6063-A6061

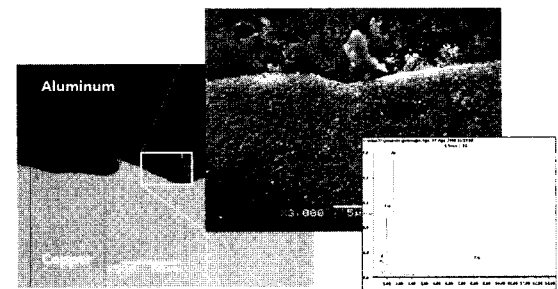


Fig. 11 Magnetic pulse welded interface of A6063-C1221

기펄스 용접계면을 관찰한 것이다.

용접계면에서는 전자기펄스용접에 의한 웨이브를 관찰할 수 있으며, 특이사항으로 계면사이에서 금속간화합물이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. EDS 분석 결과 금속간화합물은 Al: 45.3 wt%, Cu: 51.6 wt%, O: 3.1 wt%로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. M.Marya⁹⁾는 알루미늄과 구리의 전자기펄스용접에서 금속간화합물의 생성은 비록 시간이 매우 짧지만 충돌에 의한 온도상승과 알루미늄과 구리와 발열반응에 의한 확산에 기인하는 것으로 보고하였고, 가장 형성되기 쉬운 금속간화합물로 γ_1 -Cu₄Al₉으로 추정하였다. A.Stern¹⁰⁾은 전자기펄스용접 시 충돌에 의한 국부적인 용융이 발생하여 응고과정에서 준안정 금속간화합물이 형성될 수 있다고 보고하였다.

한편, 금속간화합물에 대한 경도는 103.5Hv로 주위의 알루미늄(78.4Hv), 구리(106.8Hv)와 비교시 구리에 가까운 값으로 나타났다. 이러한 금속간화합물의 보다 정확한 형성과 원인에 대하여는 보다 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

전자기펄스용접에서 접합간격이 용접강도에 미치는

영향에 대하여 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전자기펄스 방출시간은 인가전압이 변하더라도 변화가 없었다.
- 2) 전자기펄스용접에서 접합간격의 증가는 같은 인가전압에서 변형부 폭을 증가시키는 역할을 하였다.
- 3) 접합간격이 증가함에 따라 압축강도가 증가하다가 감소하는 경향을 가지는 것은 접합간격이 너무 넓은 경우 시험편의 변형에 대한 저항력이 충돌속도를 감소시키는 역할을 하였기 때문이다.
- 4) 이종소재인 알루미늄과 구리에 대한 전자기펄스용접 결과 용접계면에서는 γ_1 -Cu₄Al₉으로 추정되는 금속간화합물이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. Powers, H.G. : Bonding aluminum by the capacitor discharge magnetic pulse forming process, *Welding Journal*, **46-6**(1967), 507-510
2. Anna Kochan : Magnetic pulse welding shows potential for automotive applications, **20-2**(2000), 129-131
3. Mark Pezzutti : Innovative welding technologies for the automotive industry, *Welding Journal*, **79-6**(2000), 43-46
4. V.Shiribman: Take advantage of the new magnetic pulse welding process, *Svetsaren*, **2-3**(2001), 14-16
5. M. Kojima and K. Tamaki: Electromagnetic welding of tube, *International symposium of the Japan Welding Society*, April (1990), 201-206
6. H. Hokari, T. Sato, K. Kawauchi, and A. Muto: Magnetic Impulse Welding of Aluminium Tube and Copper Tube with Various Core Materials, *Welding International*, **12-8** (1998), 619-626
7. K.Okagawa, T.Aizawa : Effect of gap on seam welding by applying magnetic pressure, *Journal of the JSTP*, **47-7**(2006), 632-636
8. T.Aizawa, M.Kashani, K.Okagawa: Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC steel sheet joints, *IIW2005 International Conference*, **10-15** July, 2005, Prague, 1-11
9. M.Marya, D.Priem, S.Marya : Microstructures at aluminum-copper magnetic pulse weld interfaces, *Materials Science Forum*, **426-432**(2003), 4001-4006
10. A.Stern, M.Aizenshtein : Bonding zone formation in magnetic pulse welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, **7-5**(2002), 339-342