

# 전자기력을 이용한 케이블 러그 조인트 개발

심지연<sup>+</sup>, 강봉용<sup>\*</sup>

(Manuscript received: Sep, 20, 2012 / Revised: Feb, 2, 2013 / Accepted: Feb, 5, 2013)

## Development of Cable Lug Joint Using Electromagnetic Force

Ji-Yeon Shim<sup>+</sup>, Bong-Yong Kang<sup>\*</sup>

### Abstract

Recently, there has been a trend in the manufacturing process to focus on the durability of cable lug joint, especially in welding process due to the poor cable lug joint causes many troubles on products and workers during manufacturing process. Therefore development of high quality cable lug joint is important for successful manufacturing process and safety of worker. The Magnetic Pulse Forming(MPF) is one of efficient way to developed a high quality cable lug joint. In MPF, a high strain rate forming process, utilizes a high velocity oblique collision on the workpiece to be formed in required shape. The objective of this paper is to develop of high quality cable lug joint using electromagnetic force. To successfully accomplish this goal, section and electrical contact temperature of developed cable lug joint has been compared with various cable lug joint. Electrical contact temperature of developed cable lug joint by electromagnetic force is lower than manufactured cable lug joint by pressurer and hydraulic pressurer.

**Key Words** : Cable lug joint(케이블 러그 조인트), Electromagnetic force(전자기력)

## 1. 서론

조선, 자동차 산업 등 여러 산업분야에서 배터리의 전원을 사용하는 전장품들은 배터리의 전위와 동일한 전위를 최단거리로 얻기 위하여 케이블을 통하여 접지하며 이를 위하여 접지용 러그 조인트를 사용하게 된다. 특히 제품의 품질 및 생산성을 결정하는 뿌리기술인 용접기술은 최근 고품질 용접부 확보를 위한 관련 연구가 확대됨에 따라 용접기 수요가 증가하고 있으며 현장 용접 시 고효율의 작업 환경 확보를 위한 용접용 피더와 50m이상의 긴 파워케이블의 사용이 더욱 증가할 예정이다.

용접공정시 케이블은 Fig. 1과 같이 용접기로부터 전류·전압을 전송시켜주는 역할을 하며 이때 접촉부인 러그 조인트가 손상되면 전류·전압이 공급이 불안정하여 용접의 품질에 영향을 미치며 또한 가열된 러그 조인트와 파워 케이블로 인하여 작업자의 안전을 위협한다<sup>(1-2)}</sup>.

일반적으로 국내 케이블 러그 조인트는 전기전도도가 우수한 구리 또는 구리 합금이 사용되며 이때 압착기에서 유압을 발생시키는 방법으로서 Fig. 2와 같이 작업자의 수작업을 이용하는 수동식 압착기와 전동모터의 회전력을 이용하는 전동식 유압 압착기 등으로 분류할 수 있다.

<sup>+</sup> 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

<sup>\*</sup> 교신저자, 한국생산기술연구원 친환경부품소재센터  
주소: 전주시 덕진구 팔복동 2가 838-11번지

✉ Corresponding Author E-mail: kanbo@kitech.re.kr

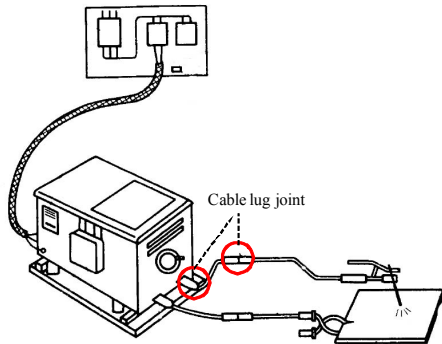


Fig. 1 Cable lug joint for welding process

대부분의 압착기 개발은 무게가 가볍고 부피가 작은 휴대용 압착기 개발에 집중되고 있다. 그러나 이러한 장치를 이용하여 제조된 케이블 러그 조인트는 가공 오차로 인하여 균일한 품질을 확보할 수 없다. 이러한 케이블과 러그와의 접착 불량은 고온에 의한 마찰마모 및 전기적 부식등의 문제점이 발생되어 결국 완제품의 원가상승 요인으로 작용하고 있다. 또한 케이블 러그 조인트의 사용횟수가 증가됨에 따라 점차 접합부가 마모되며 느슨한 압착으로 내구 수명이 단축되어 케이블 러그 조인트의 잦은 교체에 따른 생산성에 저해 요인으로 작용한다. 따라서 비용을 최소화 하면서도 만족할만한 성능의 제품을 양산할 수 있는 공정 도입이 시급히 요구되고 있다.

전자기력을 이용한 성형 공정은 기술은 Fig. 3과 같이 코일과 성형재에 발생하는 자장에 의한 압력을 사용하므로 물리적인 접촉없이 금속을 가공하는 방법으로 환경오염 발생원인 윤활유 없이 고품질의 제품을 생산할 수 있는 친환경적인 성형기술이다. 또한 충전된 고에너지를 코일을 통하여 순간적으로 방전하여 발생하는 전자기력을 이용하여 성형물을 고속 충돌시켜 성형하는 기술로서 성형이 수십 us내에서 이루어지기 때문에 생산성이 매우 높은 성형공정이다. 이러한 전자기 펄스 성형 기술은 전기·전자, 자동차, 우주·항공산업 등 산업전반에 다양하게 적용할 수 있어 실제 생산현장에서 본 기술을 적용하여 높은 생산성 및 고품질을 통한 경제적 효과를 얻고 있으며 최근 IUL(Institute of Forming Technology and Lightweight

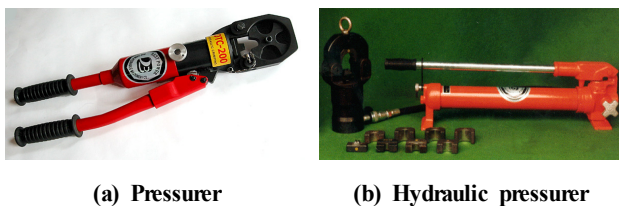


Fig. 2 Pressurer for cable lug joint forming (Dae Chun Hydraulic Co., Ltd)

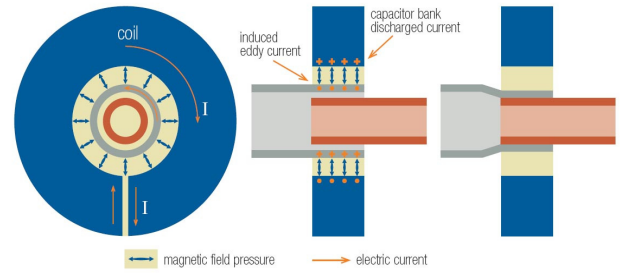


Fig. 3 A Schematic diagram of MPF<sup>(3)</sup>

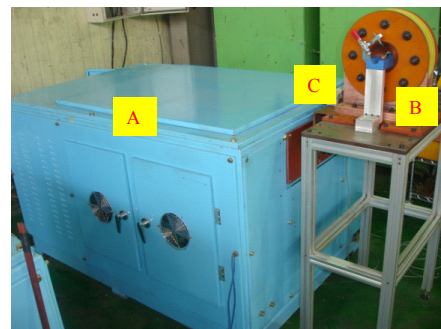
Construction) 및 OSU(Ohio State University)를 중심으로 관재 용접 기술을 이용한 성형 공정 개발 등 본 기술의 상용화를 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 미국 Hughes사 등은 전자기 펄스 성형 공정을 이용한 고품질 케이블 러그 조인트를 개발하여 생산성 증가 및 비용절감 효과를 얻고 있다.

따라서 본 연구는 기존의 케이블 러그 조인트 접합부 제조 공정이 아닌 전자기 펄스 성형 공정을 이용한 케이블 러그 조인트를 개발하고 압착기, 유압식 압착기에 의해 제작된 러그 조인트와 외관 및 단면을 비교하고 접촉부의 온도 측정을 통하여 전자기 펄스 성형 공정에 의하여 제작된 케이블 러그 조인트의 우수성을 검증하고자 한다.

## 2. 케이블 러그 조인트 개발

전자기력을 이용한 고품질 케이블 러그 조인트 개발을 위하여 전자기력 발생 전원장치, 성형코일, 로고우스키코일로 구성된 전자기 펄스 성형시스템을 이용하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 전자기 펄스 성형 장치이다.

전자기력 발생 전원장치는 최대 충전에너지량이 36kJ, 최대 10kV를 충전할 수 있는 웰메이트(주)사의 W-MPF36을 사용하였으며 성형 코일의 입력 전류 측정을 위한 로고우스키코일(Rogowski coil)을 전자자기력 발생 전원장치와 성형코일의



A : Magnetic pulse power source  
B : 4turn forming coil  
C : Rogowski coil

Fig. 4 Experimental setup of MPF for the cable lug joint

연결부에 설치하였다. 로고우스키코일은 비자성 코어에 감겨진 권선으로 구성되며 1차 도체에 감기만 하면 되는 간단한 구조로 대전류 방전장치등에서 전류 측정 장치로써 활용 가능하다. 성형코일은 가공물 표면에 순간적으로 고자기장을 생성시켜 가공재를 요구형상으로 성형하는데 사용된다.

따라서 공정중의 충격력에도 견뎌내며 안전성을 유지하기 위한 충분한 기계적 강도와 질량을 갖고 전기저항이  $2.07e-8$  (ohm-m)인 베릴륨동을 가공하여 사용하였으며 코일의 외측에서 내측방향으로 압축되는 솔레노이드 형의 압축 코일 형태로 제작하였다.

자속집중기(field shaper)는 성형코일과 가공재 사이에 위치하며 성형코일로부터 전류가 방전되면 기전력 의해 가공재로 유도전류를 전달한다. Fig. 5은 자속집중기의 원리로서 성형코일에 전류가 흐르면 자속집중기의 외측표면에 코일의 전류( $I_1$ )와 반대방향으로 유도전류( $I_2$ )가 생기고, 이 유도전류는 또 다시 자속집중기의 내측표면에 이와 반대방향의 전류를 유도한다.

이 유도전류에 의해 자속집중기 표면과 모재 사이에 자기장이 형성되고 가공재 표면에 또 다른 반대방향의 유도전류( $I_3$ )가 생성되며 반대방향으로 흐르는 전류사이의 반발력 즉 전자기력에 의하여 성형이 이루어지게 된다. 이러한 자속집중기를 이용하면 낮은 충전에너지로 높은 전자기력을 얻을 수 있다. 자속집중기의 설계는 코일과 마찬가지로 가공물의 형상에 적합하게 제작되어야 한다. 또한 코일과의 전기적 결합상태가 좋아야

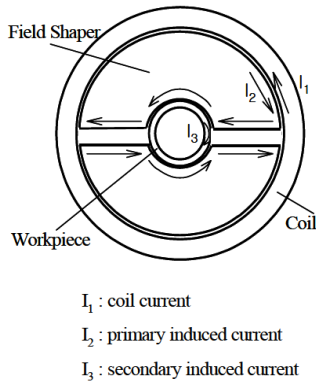


Fig. 5 Principle of field shaper<sup>(3)</sup>

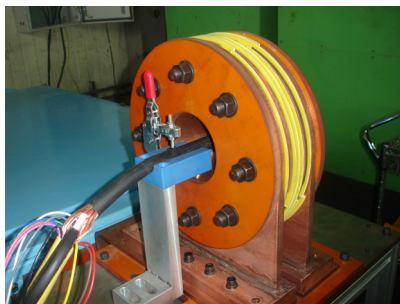


Fig. 6 Forming coil for the cable lug joint

하므로 전기적 특성이 좋고 공정 시 충격력을 견딜 수 있도록 기계적 강도가 좋은 재료 선정이 요구된다. 따라서 Fig. 6과 같이 베릴륨동을 가공하여 사용하였다.

케이블 러그는 코일 가장자리까지 삽입하였으며 성형코일과 케이블 러그 거리는 시편 조작 편의 및 절연내압을 고려하여 1mm로 설정하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 케이블과 러그로서 SAMSUNG A/S사의 CO<sub>2</sub>용접 케이블과 러그의 세부 사양이며 Table 2와 같이 충전전압 4, 5, 6kV에서 제작되었다.

개발된 케이블 러그 조인트는 Fig. 7와 KS C IEC 60974-12 (아크 용접 설비-용접 케이블용 접속 장치)에 근거하여 신뢰성을 확보하고자 표면 육안검사 및 Fig. 8와 같이 매크로(Marco) 단면관찰을 통하여 품질 상태를 조사하였다.

Table 1 Cable and lug specification for in this study

Cable	Length(mm)	10,000±10
	Diameter(mm)	10
	Wire property	Cu
Lug	Length(mm)	70
	Diameter(mm)	20

Table 2 Forming condition

Capacitor	6
Capacitance(uF)	720
Charged voltage(kV)	4,5,6
Energy(kJ)	6.7, 10.5, 15



Fig. 7 Experimental setup of temperature measurement for the cable lug weld joint

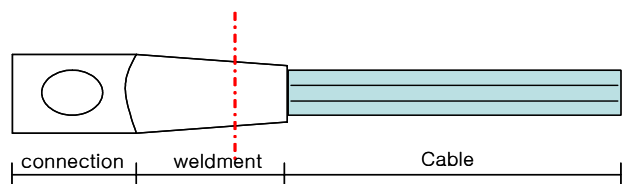


Fig. 8 Position for section analysis

### 3. 케이블 러그 조인트 성능평가

#### 3.1 파형 분석

Fig. 9는 충전된 에너지를 working coil에 방전 시 측정된 파형으로서 감쇠진동의 sin파 형상이 기록되었으며 성형에 필요한 피크 전류까지의 시간은 약 50us이다. 충전전압이 4kV, 5kV, 6kV로 점차 증가하여도 피크 전류까지의 시간은 50us로 동일하였으며 피크 전류는 각각 304kA, 380kA, 456kA이다. 러그의 압착을 위한 전자기력은 피크전류값을 이용한 전자기 해석 모델<sup>(4)</sup>을 이용하여 각각 234MPa, 281MPa, 328MPa으로 계산되었다.

#### 3.2 단면 분석

케이블 러그 조인트의 가공 오차와 반복적인 사용으로 인한 마모 및 부적절한 접속은 케이블과의 접촉면에서의 스파크 발생과 접속부의 과열을 초래한다. 또한 일반적으로 현장 접합시 러그 표면은 신속성과 간편성을 위하여 무도장 처리되어 케이

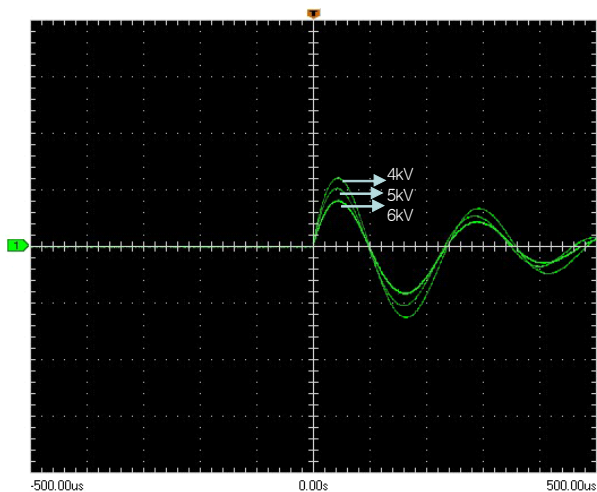


Fig. 9 Discharge waveform(5V/div, 100us/div)

Table 3 Calculated peak current and electromagnetic pressure

Charged voltage (kV)	Measured volt (V)	Peak current (kA)	Electromagnetic pressure (MPa)
6	6	456	328
5	5	380	281
4	4	304	234

\* Calibrated conversion factor (kA/V) : 76

\* Electromagnetic pressure(P)

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

B : magnetic flux density Wb/m<sup>2</sup>

μ : Permeability

블과 접합부의 미세한 공간으로 우수 등이 침투하여 부식이 진행되며 결국 러그 조인트의 수명을 단축시키는 주요한 요인으로 작용한다<sup>(1-2)</sup>. 전류전달의 효율과 가장 밀접한 관계를 갖는 케이블과 러그 사이의 밀도 역시 품질을 결정짓는 매우 중요한 요소로서, 케이블과 러그의 체결력과 러그 조인트 내 케이블간



(a) Pressurer



(b) Hydraulic pressurer



(c) Magnetic pulse forming

Fig. 10 Manufactured cable lug joint



(a) Pressurer



(b) Hydraulic pressurer



(c) Magnetic pulse forming

Fig. 11 Section of manufactured cable lug joint

밀도는 용접공정에 매우 큰 영향을 미친다. Fig. 10은 그림 압착기, 유압식 압착기와 전자기력을 이용한 케이블 러그 조인트의 표면으로서, 압착기를 이용한 케이블 러그 조인트의 경우 러그의 일부분만 압력이 가해져 케이블과 러그의 접합이 불량하며 유사하게 유압식 압착 또한 러그의 중심에서 가장자리 부분으로 압력이 가해져 케이블과 러그의 완전한 접착이 불가능하다. 그러나 전자기력을 이용한 케이블 러그 조인트는 코일 위치에 따라 접착부에 균일한 전자기력이 적용되므로 케이블과 러그사이의 밀도가 매우 높다. 이러한 내부 밀도는 외부 충격 및 진동에 의한 케이블과 러그의 분리를 방지할 수 있다.

Fig. 11은 압착기, 유압식 압착기 및 전자기 펄스 성형 장치를 이용한 케이블 러그 조인트 접합부 단면으로 압착기와 유압식 압착기에 의해 제작된 러그 조인트는 전자기력에 의해 제작된 러그 조인트와 비교하여 접합부내 케이블의 밀도가 높은 것을 육안으로 확인할 수 있다.

전자기력을 이용한 케이블러그 제작 시, 성형 코일내로 삽입되는 러그의 길이를 고정 후 고에너지를 방전하므로 접합부에 균일한 전자기력이 발생되어 케이블 간 고밀도 결합이 이루어진다.

### 3.3 표면 온도 상승

러그 조인트 접합부 온도상승 측정을 위하여 KS C IEC 60974-12에 근거하여 아크 용접기를 통하여 300A의 전류를 지속적으로 부하시켜 러그 조인트의 연결부에서 LumaSense Technologies 사의 비접촉 온도 계측기인 IGA15plus를 이용하여 온도 상승을 확인하였다<sup>(5)</sup>. 케이블을 지나는 정격 전류에 의하여 야기된 러그 조인트 접합부 온도상승은 외부표면의 가장 뜨거운 부분에서 40K, 접속 장치의 용접 케이블 연결부에서 45K으로 규정되어 있으며 이들 값들은 주위 대기온도(최대 40°C)에 관한 온도 상승이다.

Fig. 12은 실내 온도는 32°C에서 압착기, 유압식 압착기와 전자기 펄스 용접장치를 이용한 케이블 러그 조인트에 지속적으로 300A를 전달하였을 때 온도 측정 결과이다. 시간이 경과함에 따라 온도가 지속적으로 증가하였으며 20분 경과 후 전자기력을 이용하여 제작된 케이블 러그 조인트의 온도상승은 약 35°C였으며 압착기를 이용한 케이블 러그 조인트의 표면 온도는 약 42°C로 제작방법에 따라 표면 온도차는 약 7°C로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 이러한 표면 온도차는 더욱 증가하였으며 160분 경과 후 압착기, 유압식 압착기, 전자기력을 이용한 케이블 러그 조인트의 표면 온도는 각각 65°C, 63°C, 56°C로 측정되었다. 이러한 온도차는 전자기력을 이용한 케이블 러그 내 케이블의 밀도가 증가함에 따라 온도 상승속도에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 따라서 전자기력을 이용한 케이블 러그 조인트의 경우 낮은 온도 상승으로 작업자의 안전을 확보할

수 있으며 제품의 수명이 증가하여 제조원가를 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

충전전압이 4kV, 5kV, 6kV로 증가하였을 때 케이블 러그 조인트의 표면 온도를 Fig. 13과 같이 측정하였다. 시간이 경과함에 따라 온도가 지속적으로 증가하였으며 20분 경과 후 충전전압 4kV에서 제작된 케이블 러그 조인트의 온도상승은 약 36°C, 충전전압 5kV, 6kV에서는 동일하게 35°C로 표면 온도차는 거의 없었다.

그러나 시간이 증가함에 따라 표면 온도차는 증가하였고 160분 경과 후 4kV, 5kV, 6kV에서의 케이블 러그 조인트의 표면 온도는 각각 65°C, 60°C, 56°C로 측정되었다. 이러한 현상은 충전전압 4kV에서는 전자기 성형 공정 시 러그와 케이블의 결합을 위한 충분한 전자기력이 발생되지 못함에 따라 러그 내 케이블의 밀도가 낮아 시간이 지남에 따라 표면의 온도가 급격히 상승한 것으로 판단된다. 따라서 고품질의 케이블 러그 조인트를 확보하기 위해서는 5kV이상의 충전전압이 요구된다.

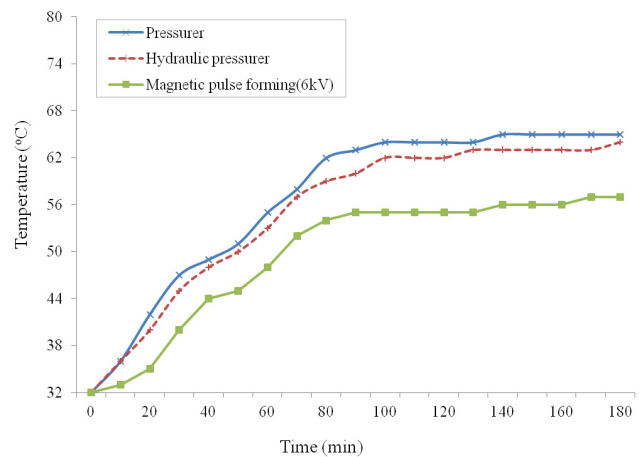


Fig. 12 Electrical contact temperature with various lug joint

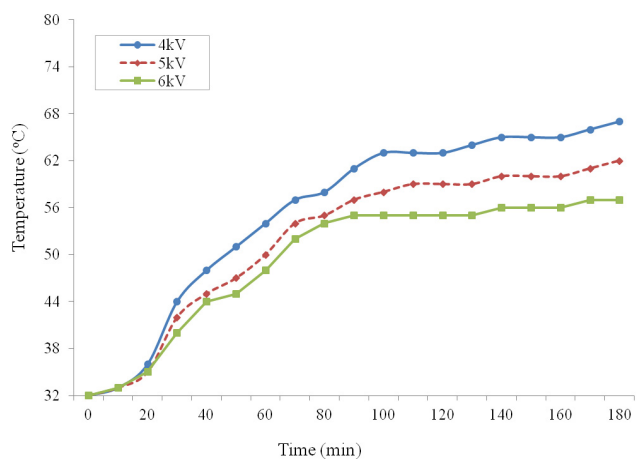


Fig. 13 Electrical contact temperature with various charged voltage

#### 4. 결론

본 연구는 전자기 펄스 성형 공정을 이용한 케이블 리그 조인트를 개발하고 압착기, 유압식 압착기에 의해 제작된 리그 조인트와 외관, 단면을 비교하고 용접 공정시 시간에 경과에 따른 케이블 리그 조인트 표면의 온도를 측정 측정하여 전자기력에 의하여 제작된 케이블 리그 조인트의 우수성을 검증하였다.

- (1) 전자기 성형 공정 시 성형코일에 의하여 리그에 균일한 전자기력이 작용하므로 케이블과 리그의 결합력을 증대시켜 가공편차가 없이 제작되어 내부 밀도가 높다. 또한 균일한 압착 품질을 확보할 수 있어 지속적으로 전류가 부하되었을 때 온도 상승이 적고 외부 충격 및 진동에 의해 쉽게 분리되지 않는다.
- (2) 고품질의 케이블 리그 조인트 개발을 위해서는 최소의 전자기력이 요구되며 충전전압 5kV이상에서 고품질의 케이블 리그 조인트를 확보할 수 있었다. 개발된 케이블 리그 조인트는 작업자의 안전을 확보할 수 있으며 제품의 수명이 증가하여 제조원가를 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- (1) Lee, J. H., Kim, J. C., Jo, S. M., and Lee, K. K., 2006, "Development of the Coupling Devices for Welding Cables Considering Electrical Contact Resistance and Temperature Increase Characteristic in Arc Welding," *Proceeding of Korea Welding Society Conference*, pp. 262~264.
- (2) Lee, J. H., Lee, K. K., Kim, J. Y., and Jo, S. M., 2007, "Examination of Rated Current and Rated Duty Cycle Considering Time Period of Welding Cable," *Proceeding Of Korea Welding Society Conference*, pp. 63~66.
- (3) Shribman, V., Livschitz, Y., and Gafri, O., 2005, "The Application of Magnetic Pulse Welding in the Automotive Industry," *Advanced Transmission Design & Performance*, Vol. 38, No. 4, pp. 21~27.
- (4) ANSYS Inc, 2010, *ANSYS User's Manual Version 10.0*, USA.
- (5) Kim, G. S., and Park, S. C., 2012, "A Study on the Characteristics of Temperature Distribution according to Material and Position of Filter in a Diesel Particulate Filter," *Journal of KSMTE*, Vol. 21, No. 6 pp. 903~909.
- (6) Hokari, H., Sato, T., Kawachi, K., and Muto, A., 1998, "Magnetic Impulse Welding of Aluminium Tube and Copper Tube with Various Core Materials," *Welding International*, Vol. 12, No. 8, pp. 619~626.
- (7) Bottauscio, O., Chiampi, M., and Manzin, A., 2000, "Magnetic Pulse Welding Shows Potential for Automotive Applications," *Assembly Automation*, Vol. 20, No. 2, pp. 129~132.
- (8) Kang, B. Y., Shim, J. Y., Kim, I. S., Park, D. H., Kim, I. J., and Lee, K. J., 2009, "Development of Working Coil for Magnetic Pulse Welding," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 6~12.
- (9) Kang, B. Y., Shim, J. Y., Kang, M. J., and Kim, I. J., 2008, "Principle and Application of Magnetic Pulse Welding," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 5~11.
- (10) Spitz, B. T., and Shribman, V., 2000, "Magnetic Pulse Welding for Tubular Applications," *The Tube & Pipe Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 32~34.
- (11) Zhang P., 2003, *Joining Enabled by High Velocity Deformation*, A Thesis for a Degree of Doctorate, Ohio State University, USA.
- (12) Toros, S. O., and Kacar, F., 2008, "Review of Warm Forming of Aluminum-magnesium Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 20, No. 7, pp. 1~12.
- (13) Kamal, M., and Daehn, G. S., 2007, "Agile Manufacturing of a Micro-embossed Case by a Two-step Electromagnetic Forming Process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 190, No. 1, pp. 41~50.
- (14) Seth, M., Vohnout, V. J., and Daehn, G. S., 2005, "Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 3, pp. 390~400.
- (15) Oliveira, D. A., Worswick, M. J., Finn, M., and Newman, D., 2005, "Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet : Free-form and Cavity Fill Experiments and Model," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1, pp. 350~362.
- (16) Lee, H. M., Kang, B. S., and Kim, J., 2010, "Development of Sheet Metal Forming Apparatus Using Electromagnetic Lorentz Force," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 1, pp. 38~43.
- (17) Lee, J. S., 1988, "Electro-magnetic Forming," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 44~46.