

박판 고속 플라즈마 맞대기 용접에서 용접 시작부의 용락과 미용융에 미치는 시작블록과 아크길이의 영향

추용수* · 홍성준** · 정재필*** · 조상명****

*부경대학교 대학원 소재프로세스공학과

**LG전자 생산성연구원

***서울시립대학교 신소재공학전공

****부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

The Effects of Start Block and Arc Length on Melt Through and Unmelted Zone at Welding Start in High Speed Plasma Arc Welding of Thin Plate

Yong-Su Chu*, Seong-Joon Hong**, Jae-Pil Jung*** and Sang-Myung Cho****

*Dept. of Materials Processing Eng., Graduate School, Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

**Productivity Research Institute, LG Electronics, Gyeonggi-do, 451-713, Korea

***Dept. of Materials Sci. and Eng., University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

****Div. of Advanced Materials Sci. and Eng., Dept. of Materials Processing Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

Abstract

In welding of thin plate, some defects such as melt through and unmelted zone occur easily at welding start, however there is a limited study on those problems. Therefore the effects of start block and arc length on melt through and unmelted zone at start were investigated in this study. When start block height was lower than base metal, there was melt through at start. And when the height was even with base metal, no unmelted zone existed. Unmelted zone was increased as start block height increased from 0mm to 0.5mm. However unmelted zone was not much changed as the height increasing from 0.5mm to 1.0mm. When gap existed between start block and base metal, melt through occurred. However, unmelted zone was increased as the contact force of start block on base metal was increased from 0kgf to 7.5kgf. And when arc length was decreased from 3.8mm to 3.0mm, unmelted zone was decreased. It was concluded that the optimum condition to prevent melt through and to minimize unmelted zone would be with start block height 0.25mm, contact force 3.0kgf, and arc length 3.4mm. This optimum condition was applied to the mass production line and resulted in satisfied outcome.

*Corresponding author : hjhus@hanmail.net

(Received March 6, 2008)

Key Words : Plasma Arc Welding, Thin plate, Unmelted Zone, Melt through, End effect, Melting efficiency, Standoff

1. 서 론

플라즈마 아크용접은 수축된 아크로 인해 그루브 없이 그리고 용가제의 첨가 없이 용접할 수 있는 장점이 있다¹⁾. 그러나 박판의 경우에는 용락과 같은 용접결함

이 문제되고 있고, 용락을 방지하기 위해 입열량을 줄이는 경우에는 시작부의 미용융부가 또 다른 문제점으로 대두되고 있다. 또한 후판에서는 시종단부의 결함을 방지하기 위해 모재와 같은 두께와 재질의 시작탭과 종료탭을 사용하지만 용접 후 시작탭과 종료탭을 제거하는 후공정이 필요하기 때문에 대량생산 라인에 적합하

지 못하다. 그러나 박판의 용융주행용접에서와 같이 열전도율이 높은 동합금의 두꺼운 시작블록과 종료블록을 쓰면 용융되지 않기 때문에 연속적으로 재사용이 가능하다. 또한 제거공정이 필요 없기 때문에 대량생산 라인에 적용 시 경제적인 장점이 있다.

이런 장점에도 불구하고 시작블록의 상태에 따라 용접부의 품질이 변동하게 되어 용락이나 미용융부가 발생할 가능성이 있지만 그에 대한 연구는 부족한 실정이다. 미용융부가 지나치게 길면 용접결함으로 간주되기 때문에 미용융부 길이를 최소화하는 것이 필요하다. 그러나 미용융부가 존재하지 않는 조건이 되면 때때로 용락 발생이 문제시 되므로 미용융부 길이는 1mm 이하의 적절한 값이 되도록 하는 것이 바람직하다.

플라즈마 용접에서 주요 공정 변수로는 크게 플라즈마 전류, 수축노즐의 직경과 형태, 그리고 가스의 종류와 유속을 들 수 있다²⁾. 그러나 본 연구에서는 박판 플라즈마 용접에서 시작부의 용락을 방지하고 미용융부를 최소화하는 것을 목적으로 하여 시작블록의 높이와 밀착력이 용접 시작부의 품질상태에 미치는 영향을 검토하였고, 또한 아크길이의 영향을 검토하여 실제 현장에서 적용 가능한 최적 조건을 찾아보았다.

2. 사용재료 및 실험방법

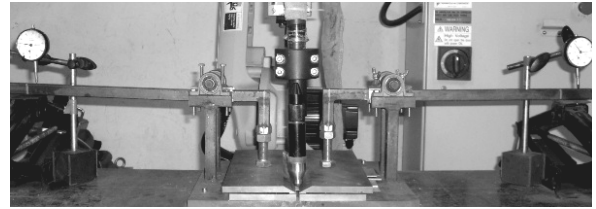
2.1 사용재료

본 연구에서는 폭90mm, 길이180mm, 두께0.5mm의 STS430J1L을 사용하였고, PAW(Plasma Arc Welding)을 이용해 멜트인(melt-in) 용접을 실시하였다.

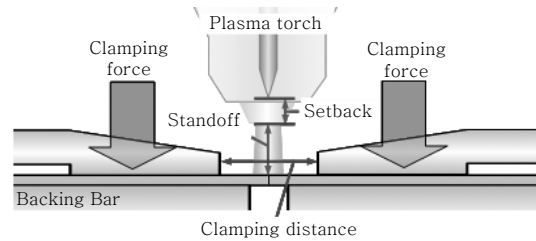
Table 1은 실험에 사용된 STS430J1L의 화학조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

Fig. 1(a)는 클램핑력을 정량적으로 정밀하게 가할 수 있도록 개발된 정밀 가압 장치와 클램프 그리고 플



(a) Clamping equipment and welding robot



(b) Schematic diagram of detailed clamping method and definitions

Fig. 1 The equipment for clamping

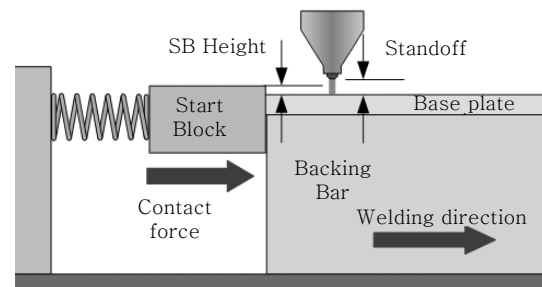


Fig. 2 Schematic diagram of experimental condition and definitions

라즈마 토치와 용접용 로봇을 나타내고, Fig. 1(b)는 클램프의 상세 모식도 및 정의, 그리고 플라즈마용접에서 셋백(Setback)과 스탠드오프(Standoff)의 정의를 나타낸다.

Fig. 2는 시작블록의 위치와 밀착방법의 모식도를 나타내고, 각각의 용어를 정의하고 있다. 20×13×13mm 크기의 Cr-Cu 블록을 스프링상수 1.5kgf/mm를 가진 스프링을 사용하여 정량적으로 밀착시키는 방법을 개발하여 밀착력 변경실험을 하였다. 클램프와 백킹바 사이에 모재를 넣고 클램핑 장치로 고정 시킨 후 멜트인 용접을 실시하였다. 모든 실험에서 클램프와 백킹바로의 열전도율을 동일하게 하기 위해 클램프 간격은 10mm, 클램핑력은 41kgf, 그리고 백킹바 사이의 간격은 3mm로 고정하여 실험하였고, 용접 이면부의 산화를 방지하기 위하여 100% Ar 백실딩을 하였다.

2.2.1 용접 조건 변경 실험

Table 2는 용접 조건 변경의 실험 조건을 나타 낸 것

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of STS430J1L

| (a) Chemical composition (Wt. %) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------------|----------|-------------|-----------|
| C | Si | Mn | S | Cr | Cu |
| 0.025 | 1.00 | 1.00 | 0.030 | 16.00~20.00 | 0.03~0.80 |
| (b) Mechanical properties | | | | | |
| Yield strength | Tensile strength | Elongation | Hardness | | |
| 205MPa | 390MPa | 22% | 200 Hv | | |

Table 2 Experimental conditions

| | | |
|--------|----------------------|------------------------------------|
| Fixed | Welding Speed | 25mm/sec |
| | Setback | 2mm |
| | Clamping distance | 10mm |
| | Clamping force | 41kgf |
| | Back groove distance | 3mm |
| Exp. 1 | Current | 54A |
| | Arc Length | 3.8mm |
| | Contact Force | 3kgf |
| | Start Block Height | -0.25, 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00mm |
| Exp. 2 | Current | 50A |
| | Start Block Height | 0.25mm |
| | Arc Length | 3.8mm |
| | Contact Force | 0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0kgf |
| Exp. 3 | Current | 50A |
| | Start Block Height | 0.25mm |
| | Contact Force | 3kgf |
| | Arc Length | 3.0, 3.4, 3.8mm |

이다. Ex. 1은 시작블록의 높이, Ex. 2는 시작블록의 밀착력 그리고 Ex. 3은 아크길이에 따른 시작부의 품질 비교 실험의 조건을 나타내고 있다. 여기서 아크길이는 셋백과 스탠드오프를 더한 길이이다.

2.2.2 시작부의 미용용부 측정 방법

Fig. 3은 시작부의 표면과 이면의 미용용부 길이의 정의이다. 미용용부 길이를 측정하기 위하여 용접 후 표면과 이면을 현미경으로 동일한 비율로 촬영한 후 CAD 디지털라이저를 사용하여 정량적으로 길이를 측정하였다.

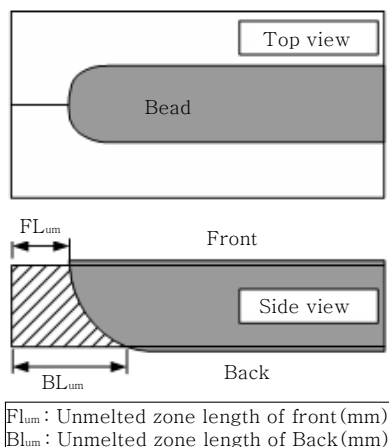


Fig. 3 Definition of unmelted zone length of front and back side of weldment

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시작블록 높이에 따른 미용용부 길이

Fig. 4는 시작블록의 높이 변화에 따른 시작부의 표면과 이면의 미용용부 길이 측정 결과이다. 시작블록의 높이가 모재보다 낮은 -0.25mm일 때 용락이 발생했고, 시작블록의 높이가 모재의 높이와 같은 0mm일 때 표면의 미용용부가 존재하지 않았다. 그러나 실제 대량생산 라인에서는 시작블록의 높이를 완전히 0mm로 관리하기 곤란하고 루트 간격도 강하게 밀착 관리하기 곤란하므로 종종 용락이 발생하였다. 한편 시작블록의 높이가 0.50mm로 높아질수록 표면과 이면의 미용용부 길이가 증가하는 것을 그래프에서 확인할 수 있다. 특히 표면보다 이면의 미용용부 길이가 더 긴 것을 알 수가 있다. 그러나 시작블록 높이가 0.50mm에서 1.00mm로 증가하는 동안은 표면과 이면의 미용용부 길이가 큰 변화 없이 유지되었다. Table 3에 시작블록 높이에 따른 표면과 이면의 사진을 나타내었다.

Fig. 5는 토치가 시작블록에서 모재로 진행됨에 따른 아크의 거동을 보인 것으로서 (a)는 시작블록이 모재보다 낮은 경우를 보여준다. 용접 시 전류는 최단거리를 통해서 가장 잘 흐르기 때문에 용접토치가 모재 위에 위치하기 전에 아크가 모재위로 편향되고, 그로 인한 과도한 입열로 용락이 발생하는 것으로 판단된다. 그러므로 시작블록의 높이는 모재보다 낮으면 안 된다는 것을 알 수 있다. (b)는 시작블록이 모재보다 높은 경우를 보여준다. 시작블록의 높이가 모재보다 높으면 토치가 시작블록을 지나 모재위에 위치하여도 아크는 시작블록 위에 머무르게 되어 토치가 용접 시작부 위에 위치하여도 아크가 모재위에 생성되지 않아 용접 시작부를 용융시키지 못하고 지나치기 때문에 미용용부를 형성하는 것으로 판단된다.

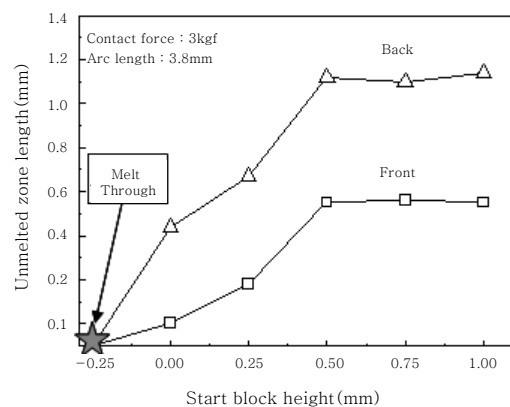


Fig. 4 Unmelted zone length with start block height

Table 3 Bead shape of front and back side with start block height

| Start block height (mm) | Front | Back |
|-------------------------|-------|------|
| -0.25 | | |
| 0.00 | | |
| 0.25 | | |
| 0.50 | | |
| 0.75 | | |
| 1.00 | | |

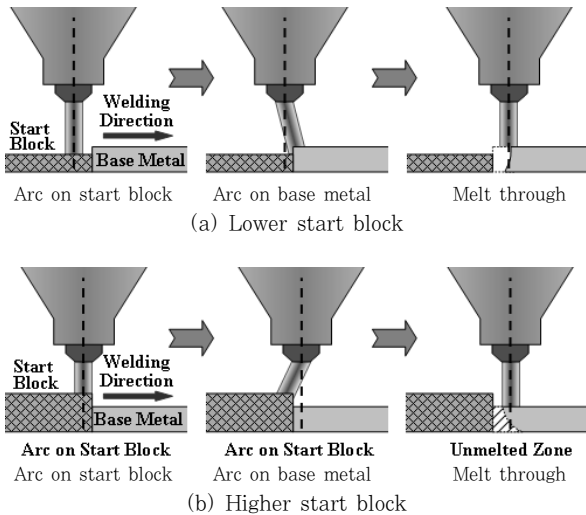


Fig. 5 Schematic diagrams of arc eccentricity with start block height

이 결과를 볼 때, 시작부의 미용융부를 없애기 위해서는 시작블록의 높이를 모재의 높이와 동일한 0mm로 유지하는 것이 가장 적합할 것으로 보이지만 모재 자체의 두께 및 평평도 편차와 세팅시의 부정확함들이 존재하기 때문에 관리가 어렵다. 그러므로 용락의 위험을 방지하면서 적절한 미용융부 길이를 가지는 시작블록 높이가 0.25mm 정도가 가장 적합할 것으로 판단된다.

3.2 시작블록 밀착력에 따른 미용융부 길이

Fig. 6은 시작블록의 밀착력에 따른 시작부의 표면과 이면의 미용융부 길이 측정 결과를 보여준다. 시작블록과 모재사이의 간격이 0.25mm 존재할 때 용락이 발생했고, 시작블록의 밀착력이 0kgf일 때 미용융부의 길이가 가장 짧았다. 그리고 시작블록의 밀착력이 커질수록 미용융부 길이가 증가했으며, 표면보다 이면의 미용융부가 더 길었다. 특히 표면의 미용융부 길이는 선형적으로 증가하지만 이면의 미용융부 길이는 0kgf에서 1.5kgf 사이에서 급격히 증가했고 1.5kgf에서 7.5kgf 사이에서는 길이 증가율이 완만하였다.

유한의 물체인 모재의 끝부분을 넘어서 열은 전도될 수 없기 때문에 전도에 의한 열손실이 발생하지 않고 다시 반사되어 끝부분에 열 집중도가 더욱 커지는 종단효과(End effect)가 발생한다. Okui 등에 의하면 종단효과로 인해 모재 끝부분에서의 열 집중도는 60%정도 더 크다고 하였다³⁾. 그러므로 시작블록과 모재사이에 간격이 존재하면 모재 끝부분에 열이 집중되어 용락이 발생하는 것으로 판단된다.

평면을 가진 두개의 고체가 접촉을 이룰 때 직접접촉(direct contact)은 실제로 매우 제한된 수의 점들에서만 이루어져 있기 때문에 완전열접촉(perfect thermal contact)상태에 있지 않고 그 틈새가 주위 유체, 즉 공기로 채워져 있다. 공기의 열전도율은 금속의 그것보다 매우 작기 때문에 계면에서 열저항으로 작용하여 열흐름을 방해한다. 이 계면에서의 열저항은 표면조도, 물질의 종류, 계면압력, 계면온도 등에 영향을 받는다. 계면압력과 계면온도의 증가와 표면거칠기의 감소에 따라 열저항이 감소하여 계면열접촉전도도를 증가시킨다⁴⁾. 그러므로 시작블록의 밀착력이 증가할수록 계면열접촉

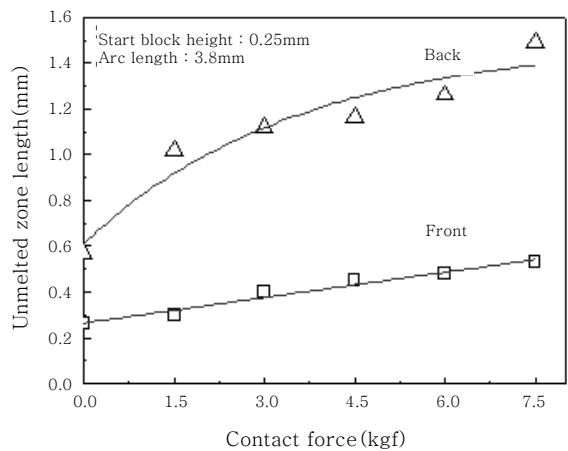


Fig. 6 Unmelted zone length with start block contact force (gap 0.25mm between start block and base metal : Melt through)

전도도가 증가하므로 시작블록으로의 열전도가 잘되어 냉각의 효과가 증가하고, 그로 인해 중단효과가 소멸되기 때문에 미용융부의 길이가 증가하는 것으로 판단된다.

그러므로 시작블록의 밀착력은 0kgf가 가장 좋을 것 같지만 실제 대량생산 라인에서 0kgf로 관리하기가 어렵고 또한 ±1.5kgf의 밀착력은 모재의 세팅 상태에 따라서 쉽게 변하기 때문에 용락을 방지하고 미용융부를 최소화하기 위해서 밀착력 3kgf 정도가 가장 적합한 것으로 판단된다.

3.3 아크길이에 따른 미용융부 길이

Fig. 7은 시작블록의 높이가 0.25mm, 시작블록의 밀착력이 3kgf일 때, 아크길이에 따른 표면과 이면의 미용융부 길이 측정 결과를 보여준다. 아크길이가 3.8mm에서 3.0mm로 짧아짐에 따라 표면과 이면의 미용융부의 길이가 짧아지는 것을 알 수 있다. 이는 시작블록에서 모재로 토치가 이동하는 순간에 아크길이가 짧아질수록 아크 편향이 적어지기 때문에 아크가 모재의 시작부에 가까이 생성되어 미용융부의 길이가 짧아지는 것으로 판단된다.

또한 표면과 이면의 미용융부 길이차이를 살펴볼 때 아크길이가 짧아질수록 그 차이가 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 텅스텐 전극을 사용한 아크 용접에서 에너지는 전극과 모재사이의 전류에 의해 주로 전달되고, 두 번째로 아크 플라즈마로부터 대기와 방사에 의해 모재로 전달되기 때문에⁵⁾, 플라즈마 용접에서 아크길이가 짧아질수록 대기로의 아크열 손실이 줄어들어 따라 용융효율이 높아지기 때문인 것으로 판단된다^{6,7)}. 그리고 용융효율이 높을수록 저입열로 고용착이 가능해져서 생산성 향상, 용접변형 저감 및 고입열로 인한 용접 결함 방지가 가능해지므로 아크길이를 짧게 가져가는 것이 유리하다.

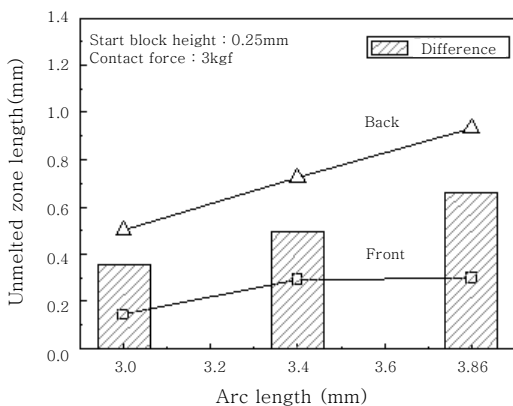


Fig. 7 Unmelted zone length and the difference between front and back with arc length

그러나 Yoon 등에 의하면 스탠드오프가 1mm 이하로 낮아지면 모재 핏업(Fit-up)의 어려움과 용접선 추적의 어려움과 같은 작업성이 떨어지기 때문에, 섯백이 2mm인 경우에 아크길이는 3mm보다 길게 유지하는 것이 필요하다⁸⁾. 그러므로 최적의 아크길이는 3.4mm 정도인 것으로 판단된다.

4. 결 론

두께 0.5mm의 STS430J1L 고속 플라즈마 아크 용접에서 시작블록의 높이와 밀착력, 그리고 아크길이가 용접 시작부 품질에 미치는 영향에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 클램핑력을 정량적으로 정밀하게 가할 수 있는 클램프 장치와 스프링을 사용하여 시작블록의 밀착력을 정밀하게 가할 수 있는 방법을 개발하였다.
- 2) 시작블록의 높이가 모재보다 낮을 때 모재 끝부분에서 용락이 발생했고, 모재와 같은 높이에서는 표면에 미용융부가 존재하지 않았다. 그 높이가 증가할수록 미용융부 길이가 점차 증가하였지만, 0.5mm에서 1.0mm 사이에서는 미용융부가 큰 변화 없이 유지되었다. 그러므로 용락을 방지하면서 미용융부 길이가 최소화될 수 있는 높이는 0.25mm 정도인 것으로 판단된다.
- 3) 시작블록의 높이 0.25mm에서, 시작블록과 모재 사이에 간격이 존재할 때 시작부에 용락이 발생했고, 시작블록의 밀착력이 0kgf에서 미용융부 길이가 가장 짧고 7.5kgf로 증가할수록 길이가 증가했다. 밀착력의 관리가 용이하면서도 미용융부 길이가 적절한 조건은 밀착력 3kgf 정도인 것으로 판단된다.
- 4) 시작블록의 높이 0.25mm, 밀착력 3.0kgf일 때, 아크길이가 3.8mm에서 3.0mm로 짧아질수록 표면과 이면의 미용융부 길이가 감소했고, 그 길이 차이도 감소했다. 1mm 이하의 스탠드오프는 작업성이 떨어지므로 아크길이 3.4mm 정도가 최적인 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구의 결과를 통해, 용락을 방지하고 표면과 이면의 미용융부 길이를 최소화시킬 수 있는 최적의 조건은 시작블록의 높이 0.25mm, 시작블록의 밀착력 3.0kgf, 그리고 아크길이 3.4mm로 판단됐고, 대량생산 라인에 적용해본 결과 만족할만한 성과를 이루었다.

참 고 문 헌

1. Y.F.HSU and B.RUBINSKY : Two-dimensionl heat transfer study on the keyhole plasma arc welding process, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 31. (1988) 1409-1421
2. 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 543-546 (in Korean)

3. N. Okui, D. Ketron, F. Bordelon, Y. Hirata, and G. Clackl : A Methodology for Prediction of Fusion Zone Shape, *Welding Journal*, (2007) 35-43
4. Y. Bayazitoglu, M.Necati Ozisik : Elements of Heat Transfer, McGraw-Hill, 1988, 84-85
5. W.H. Giedt, L.N. Tallerico and P.W. Fuerschbach : GTA Welding Efficiency: Calorimetric and Temperature Field Measurements, *Welding Journal* (1989) 28-32
6. Jin-An Cho, Dong-Soo Oh, Dong-Soo Hwang, Sang-Myung Cho : Development of the high performance digital calorimeter to measure the melting efficiency of arc welding, Proceedings of the 2006 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, **Vol 47**, (2006) 92-94 (in Korean)
7. Yung-Duk Moon, In-Ki Park, Sung-Jun Hong, Sang-Myung Cho : The effect of clamping condition on melting efficiency in plasma arc welding of steel sheet, Proceedings of the 2007 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, **Vol 48**, (2007) 303-305 (in Korean)
8. Hun-Sung Yoon, Kun-Gi Park, Jong-Soo Yang, and Sang-Myung Cho : The Effects of Welding Parameters on Quality in Lap Joint Fillet Welds of Thin Plate by Plasma Welding, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, (2006) 122-127 (in Korean)