

日本에서의 MAG 용접의 研究動向에 관하여

(Recent Trend of Research Activities of MAG Welding in Japan)

名古屋大学工学部 篠田 剛

Takeshi SHINODA, Nagoya University

1. 緒言

MAG 용접 또는 炭酸 가스 용접法은 1950년대 초기에 日本, 옛 소련, 네덜란드에서 거의 동시에 연구 및 실용화가 시작되었다. 일본에서는 名古屋大學의 關口春次郎 교수에 의하여 Si와 Mn의 共同脫酸理論을 기초로 탄산 가스 용접法의 개발이 진행되었다. 네덜란드와의 특허 문제 때문에 일본에서는 일시적으로 탄산 가스-산소 혼합 가스를 차폐 가스(shield gas)로 사용하는 炭關 아크 용접法이 채용되었다. 그 후 炭酸가스용접法 또는 제철소로부터 염가의 아르곤 가스가 제공되기 시작하여 MAG 용접法의 보급이 촉진되었다.

日本の 鐵鋼 관련 용접材料의 생산량은 Fig.1에 나타낸 바와 같이 연간 약 400,000ton이지만 그 중의 60-70%가 關口理論을 바탕으로 하는 화학 성분을 갖는 gas shield wire이다¹⁾. 한편 현재에는 가스 遮閉 용접이 널리 보급된 결과, 被覆 아크 용접棒의 비율은 20% 정도이다.

본 강연에서는 名古屋大學에서 수행되어 온 가스 차폐 용접에 대한 연구를 중심으로, 일본에서 수행된 연구의 실상을 소개하고자 한다.

2. 名古屋大學에서의 研究 結果에 대한 例

2.1 關口理論(Sekiguchi Theory)과 그 役割

關口教授²⁾는 Korber와 Oelsen의 탈산 이론을 용접金屬의 脫酸元素와 산소 함유량과의 관계로 새로이 정립하여 Fig.2에 나타낸 바와 같이 1510℃의 용융 철중의 等酸素濃度 관계를 얻었다. 즉 용융철중의 규소와 망간에 의한 공동 脫酸의 의하여 얻어지는 탈산 생성물은 세 가지로 구분된다.

界域I에서는 용융철에서 고체의 SiO₂가 생성된다.

界域II는 용융철중에 FeO-MnO-SiO₂가 액체 상태로 생성되며, 이 비금속 개재물의 용융철로부터의 이탈이 쉬워지며, 저탄소 함유량으로 되는 영역이다. 따라서 이 界域II는 용접金屬의 韌性值가 높고 용접材料로서 가장 적합한 조성 범위이다. 일본에서 생산되고 있는 와이어의 조성도 거의 이 성분 범위에 있으며, 日本工業規格(JIS)의 성분도 거의 이 범위에 위치하고 있다.

FIG.3에 나타낸 바와 같이 이러한 이론 해석이 이루어진 후 옛 소련의 와이어 화학 조성의 규격도 점차 이 영역으로 옮겨 온 것을 알 수 있다.

또 界域III은 용융철중에 고체의 탈산생성물 FeO-MnO를 정출하는 영역으로서 熔接金屬중의 非金屬介在物을 줄일 수 없는 성분 범위이다.

탄산 가스 熔接法의 普及期인 1960-1970년대에는 名古屋大學을 필두로 많은 기업, 연구가에 의하여 많은 문제점이 해결되어 새로운 현상에 대한 지식이 얻어졌다. 名古屋大學의 연구로부터 탄산 가스-산소 혼합 차폐 가스의 熔接金屬의 산소량, 탄산 가스 熔接部의 靱性和 피로 특성, 氣孔 생성, 차폐 가스의 露点, 擴散性 水素量, 熔接 移行 현상에 대하여 기초적인 성과가 얻어졌으며 강습회등에 의한 계몽활동도 널리 실시되었다.

또 와이어 성분의 일본공업규격화(JIS)와 CO₂半自動 熔接 작업자의 기량 검정시험의 JIS化는 탄산 가스 熔接法의 보급에 큰 효과가 있었다.

이와 같은 이론적이며 실용적인 연구 활동의 배경을 기초로 하여 일본의 熔接法은 炭酸 가스 熔接化로 급속히 진전되었다.

2.2 自動化를 위한 條件 選定

1970년대 후반부터 로봇등의 자동화를 추진하기 위한 熔接 條件의 最適化의 연구가 본 연구실에서 시작되었다^{3),4)}. 본 연구실에서 선택한 방법은 熔接 電流, 아크 電壓, 熔接 速度를 용융단면적과 선형적인 수식으로 관련시켜 처리하는 방법이다. 이 관계를 함수화하고 조합시키므로써 종래에는 경험적으로 결정되고 있던 조건을 컴퓨터에 의해 산정한 것이었다.

한 예로서 탄산 가스 熔接法의 V형 홈(V-shape groove) 맞대기 熔接에서 1層 1 pass 熔接에 의해 완전 용입의 이음부를 얻고자 할 경우의 flow chart와 기초식을 Fig.4에 나타낸다⁴⁾. 이 수법에서는 요구치 즉 용입 깊이 P를 얻을 때까지 계산을 반복한다. 계산 결과는 Fig.4 중의 표에 나타낸 바와 같이 熔接 條件과 그 熔接 條件에 따라 얻어질 熔接 덧살(reinforcement)의 단면적(熔着量)까지를 구할 수 있는 것이다.

실용적인 적용 예로서는 Fig.5에 나타낸 바와 같이 重電機 製鐵회사에서 대형 보일러와 파이프의 복잡한 곡면의 熔接線으로서 100 패스 이상이나 되는 多層 熔接에서 실용화되었다⁵⁾.

또 저자는 英國 熔接研究所(The Welding Institute) 유학중에 이 수법의 연구 개발에 관여하였다⁶⁾. 이 연구소에서는 함수계로 표시하는 경우에도 그 여유 범위가 있기 때문에 Fig.6에 나타낸 바와 같이 Tolerance Box라고 칭하는 허용 범위내에서 조건 결정을 수행하는 것이다.

허용 여유도에서 얻어지는 장점은 직감적으로 適正熔接條件 範圍를 나타낼 수 있다는 것이지만 결점으로는 각 Tolerance box 사이에서 상호의 선형 관계 함수의 교환이 불가능하다는 점이다. Data bank에 기초하는 것으로서 신뢰성이 있는 수법인 반면 Data bank 구축에 막대한 비용과 인원을 필요로 한다.

그 후 신뢰성이 있는 sensor의 개발에 의하여 아크 현상의 최적화가 熔接

기 자체로서 제어되게 되어 이 연구는 선구적인 역할을 수행하였다고 생각된다. 그러나 sensor의 발달이 이루어져도 기본 조건의 제시 또는 유지는 필요하다고 생각되므로 이런 유형의 연구 필요성이 있다고 생각된다.

최근 용접條件의 기본치의 지시와 용접 原價를 조합시킨 package software가 日本을 비롯하여 유럽 등지에서 시판되게 되어 현재에도 이러한 고찰 방식은 이용되고 있다. 향후의 방향은 Feed forward 제어의 도입 또는 경험식을 가능한 한 배제한 아크 물리적, 이론적인 취급 방식이 이루어질 가능성이 있다.

2.3 短絡 移行 現象과 評價法

자동차 공업의 발전과 자동차 생산에서의 抵抗용접으로부터 MAG 용접化로의 변화에 따라 名古屋大學에서도 박판의 단락 이행형 고속 MAG 용접의 연구를 시작하였다. 즉 용접現象의 컴퓨터에 의한 Data 해석을 실시하였다⁷⁾. 이 연구에서는 Fig.7의 원래의 파형으로부터 시간축을 제거하여 Fig.8에 나타난 바와 같이 단락 이행시의 파형으로부터 Fig.8과 같은 파형을 만들어 Fig.8의 각 루우프 면적의 변화를 산출하였다. 이 면적의 변화, 즉 편차값이 작은 쪽이 안정하다는 것은 자명하다. 이의 계측과 자동 판정을 계속하여 지금까지 경험적으로 결정해 왔던 조건 선정을 합리적으로 수행할 수 있게 되었다. Fig.9의 예에서는 각 루우프 면적차의 표준편차를 구한 결과, 그 편차값이 최소인 16V 정도의 아크 전압이 가장 안정된 조건임을 나타낸다.

자동차 공업에서의 가스 차폐 용접의 사용빈도를 고려할 때, 소전류, 高速 용접을 도모할 필요가 있지만, 이 경우 이행하는 용적의 표면장력이 중요한 인자가 된다고 생각한다. 각종의 界面 活性化 元素를 첨가하고, 표면장력을 조절한 와이어를 만들어 용적 이행 상황을 조사한 결과를 나타낸다. 표면장력을 낮춘 와이어 J(성분은 Fig.13에 표시)는 Fig.10에 나타난 바와 같이⁸⁾ 단락 이행이 매우 원활하며 종래의 시판 와이어 B가 불규칙적인 순간 단락을 동반함에 반하여 규칙적 단락의 비율이 높고 단락 횟수도 1초당 150회나 되어 외관상으로도 우수한 비드가 얻어졌다.

2.4 低스패터化

탄산 가스 용접은 용착속도가 크고 용입이 깊은 장점이 있지만 스패터가 많아서 외관상의 품질이 떨어지는 것이 결점이다.

이 용접法の 低스패터화는 자동차 산업을 비롯하여 박판을 사용하는 산업분야에서는 피할 수 없는 문제점이다. 低스패터화의 요구에 대하여 일본에서는 Ar-O₂ 차폐 가스의 소위 MAG용접의 채용, 전원의 Inverter화 및 Fig.11과 같이 pulse화⁹⁾를 도모하여 용적 이행을 정확히 제어하는 것으로서 대처하여 성과를

거두고 있다.

본 연구실에서도 低스퍼터화에 대해서는 전원의 제어와 더불어 와이어 화학 성분의 적정화가 필요하다고 생각하였다. 상술한 바와 같이 낮은 표면장력의 와이어를 개발하고 더욱 더 pulse전원을 조합시켜 1 pulse 1 globulur 이행을 강제적으로 수행¹⁰⁾시킴으로써 Fig.12의 결과와 같이 低스퍼터화에 대해서 성과를 거두었다.

이 경우 용적 이행 횟수는 1초당 300개 정도가 되며 용적 이행수로서는 최대한계이지만 스퍼터 양은 육안으로는 거의 관찰되지 않는 상태이다.

2.5 自動車用 亞鉛 鍍金 鋼板 氣孔 低減 와이어의 開發

와이어에 계면 활성 원소를 첨가하면 용적 및 용융지의 표면 장력, 정확하게는 표면장력의 온도 계수를 변화시키면 용융지내의 금속류가 역전하는 소위 Marangoni 대류가 생긴다. 이 대류현상에 의해 용융지내의 기공을 물리적으로 배제할 수 있는 가능성이 Kou에 의해 지적되었다¹¹⁾.

본 연구실에서는 이 가능성을 자동차용 강판의 용접에 적용하여 기공 생성의 문제가 발생되고 있는 아연 도금 강판의 용접에 적용하였다.

이 실험에서 표면 장력을 변화시키는 데에 효과적인 계면활성금속은 유황(S)이나 셀레늄(Se)임이 밝혀졌다.

Fig.13에 나타낸 바와 같이 계면활성화 원소를 첨가한 와이어 J의 경우, 낮은 아크 전압역에서 용접金屬중의 기공이 대폭 감소되고 있다.

또 와이어 X는 S, Se 이외에도 다른 계면활성화 원소를 첨가한 것으로 기공 감소가 전체 전압 범위에서 나타나고 있다. 이 표면장력을 제어한 와이어로 용접하면 종래의 와이어에 비해 대류현상이 변화됨이 실험적으로 확인되고 있다¹²⁾ 즉 용융지내의 용융금속의 유속과 방향은 Fig.14에 나타낸 바와 같이 S+Se 함유량, 0.005% 이상에서 종래의 와이어의 용융지내에서의 흐름은 역전되고 있고 기공의 물리적인 배제가 일어났음을 알 수 있다. 이러한 방식의 와이어는 실용화 되어 일본의 각 자동차 산업에서 이용되기 시작하고 있다.

2.6 DW MIG 용접법의 開發

가스 차폐 용접의 高能率化를 생각할 때 제일 먼저 고려하는 것이 고용착 속도화이다. 이러한 관점에서 두 가지 예를 설명한다.

a) DCEN Narrow Gap 용접법의 開發

건축 철골 후판의 短尺 맞대기 용접을 고려할 때 고능률화는 Narrow Gap 용접의 도입에 의해 달성할 수 있다. 또 동일한 용접電流에서 용착 속도는 전극 +(DCEP)보다 전극 -(DCEN)쪽이 크다는 것은 잘 알려져 있지만 아크가 불안정하게 되기 쉬워서 실용화되지 못하고 있다. 그러나 DCEN 용접을 Narrow Gap 내에

적용할 경우, 아크는 안정되고 와이어 측면과 groove 벽 사이에서 smooth하게 발생하여 높은 용착속도를 얻을 수 있다. 이 결과로부터 DCEN Narrow Gap 熔接法에 저렴한 glass tape backing을 사용한 短尺 이음용 熔接機를 개발하여¹³⁾ 사용하고 있다.(Fig.15)

이 Narrow Gap 熔接에서는 아크 센서의 극히 원시적인 적용방법을 사용하고 있다. glasstape back 위의 용융지와 아크 상태를 단락의 피크 전압을 monitoring 하므로써 실현되었다. 즉 아크 바로 아래에서 용융지의 상대적인 후퇴는 절연체의 glass backing 위로 아크가 진행되며 그 결과 아크 전압이 불안정하게 되고 spike상의 전압 파형이 나타난다. 이 spike 전압을 없앨 수 있도록 熔接速度를 조정하는 것이 이 방법의 원리이다.

이 방법에 의하여 연간 수 만개의 短尺 이음부의 생산에 성공하였다.

b) DW MIG 熔接法の 開發

고용착화를 위하여 흔히 사용되는 방법에는 와이어를 2본 공급하는 형식이 있으며 이 방법의 도입이 검토되고 있다. 여기서는 알루미늄의 熔接에 현재 개발이 진행되고 있는 DW-MIG(Double Wire MIG) 熔接法の 예를 나타낸다¹⁴⁾. 개략도를 Fig.16에 나타낸다. Main wire는 종래의 직류 전극 +(DCEP)이지만, 동일 용융지내에 후방으로부터 cold wire를 공급하는 방식이다. 이 후방의 와이어는 10-20 암페어 정도의 낮은 전류와 용융지로부터 아크 전압과 반대 방향의 전류를 공급받을 수 있게 한다. 평행한 와이어에 반대 방향의 전류를 흘려줌으로써 주 와이어의 아크는 전방으로 쏠리게 되며 용융지내의 후방의 cold wire를 아주 smooth하게 공급할 수 있다. 능력은 20-30% 정도 향상되며 무엇보다도 큰 효과는 용융지내의 온도가 낮아지고 熔接 變形の 低減, 알루미늄의 大電流 熔接에서 문제가 되는 packing의 저감을 도모할 수 있다. 또 응고 균열 감수성도 저하시킬 수 있음이 명백하게 되었다. 이 방법을 강의 熔接에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있지만 강의 분야에서는 아직 실용화되지 못하고 있다.

3. 結論

名古屋大學에서의 MAG 熔接 研究의 위상은 日本 熔接界가 지향하고 있는 방향과 무관하게 진행되고 있는 것이 아니다. MAG 熔接의 보급은 시대적인 요청도 있었으며 더욱이 이를 뒷받침하는 다른 많은 연구 활동과 성과도 있으며 名古屋大學의 연구는 그 중의 극히 일부분이며 그 성과도 한정되어있다. 본 강연 중에서 일본의 현황을 총괄하기 위하여 최선을 다하였지만 본인 자신에게는 너무나 힘에 부치는 큰 일이었다.

여기에서는 名古屋大學에서의 연구 결과를 기초로 일본의 MAG 熔接의 연구 방향과 보급 방향에 대한 일단을 소개하고자 하였다.

1. MAG 또는 CO₂ 熔接법에 사용되는 와이어의 양은 일본 熔接材料 생산량의

60%에 이르고 있으며 자동화, 로봇화 추진의 중심적인 역할을 완수하여 왔다. 와이어 성분의 적정화를 위하여 關口理論이 기여한 업적은 매우 컸다.

2. 계면활성화 원소에 의한 용적의 표면장력 조절은 아연 도금강판의 기공 방지, 단락 이행의 안정화, 低스퍼터화에 효과가 있다. 가스 차폐 용접용 와이어의 성분의 최적화에 대한 연구는 용접電源, 용접機器의 개발과 더불어 향후에도 진행되어야 할 중요한 과제중의 하나이다.

3. 본 강연 원고에서는 언급하지 않았지만 로봇화를 추진하는 데에 있어서 센서 기술은 필수적이다. 본 연구실에서 발표한 용접條件의 software 개발은 용접 조건의 선정, cost 계산등의 예측 기술로서 의미가 있지만, 현장에서의 도입은 센서 기술과 그 신호 처리를 조합시킴으로써 知能化시키는 것이 효과적이다. 현재 센서는 대부분 연구 또는 실용화되어 있지만 최적의 방법은 없으며 주된 방향으로서는 화상처리를 수반하는 Visual sensor나 아크 전압 변화를 모니터링하는 아크 센서로 양분되어 있다. 일본에서는 향후의 발전이 가장 기대되는 연구 분야중의 하나이다.

감사의 말씀

본인은 大學院 시대로부터 현재까지 關口, 益本 두 선생님의 가르침을 받았다. 지금은 별세하신 두 선생님께 사의를 포함과 아울러 益本 선생님의 정년 퇴임 후 名古屋大學에서의 연구를 도와준 학생, 기업의 관계자 제위께 심심한 사의를 표하는 바이다. 또 이러한 명예로운 강연의 기회를 제공해주신 大韓熔接學會에 깊이 감사하는 바이다.

- 1) Y.Sakai: Production trends of welding materials, *Welding Terchnique* 42(1994), No. 1 P.84-90
- 2) H.Sekiguchi, *Theory and Proposal on Steel Fusion Welding and Their Applications*, The Nikkan Kogyo Shinbun Co., Ltd, Tokyo 1972
- 3) I.Masumoto, T.Shinoda, Computerizing determination of the welding parameters for submerged arc butt one pass welding, *J. of Japan Welding Society*, 44(1975), No. 7 P. 573-579
- 4) I.Masumoto, T.Shinoda: Program for CO₂ welding parameters of V-butt one pass joint, *J. of Japan Welding Society*, 44(1979), No. 2 P. 101-103
- 5) S.Saikawa, H.Miyake, Study on multi-pass welding of nozzles, *Quarterly J. of the Japan Welding Society*, 2(1984), No. 2 P.269-275
- 6) T.Shinoda, J.Doherty: The relationship between arc welding parameters and weld bead geometry, *The Welding Inst. Report* 74/1978/PE(1978)
- 7) T.Shinoda, Y.Takeuchi, Data processing and statistical analyses of GMA welding phenomena, *Proceedings 3rd Int. Conf. Computer Technology in Welding*, P. 16-25, The Welding Institute(1990, June) Brighton UK
- 8) T.Shinoda, Y.Takeuchi, Effect of surface tension on short circuiting metal transfer phenomena in GMA welding, *IIW Doc.*, XII-1214-91(1991, July)
- 9) S.Harada, The presentsituation of spatter reduction method in CO₂/MAG welding processes, *Welding Technique* 41(1993), No. 2 P.81-90
- 10) Y.Takeuchi, T.Shinoda, Spatter and blowhole formation phenomena in pulsed gas shielded metal arc welding, *Materials Science and Technology*, 7(1991), No. 9 P. 869-876
- 11) S.Kou, *Welding Metallurgy*, Jhon Wiley & Sons, New York, 1987
- 12) T.Shinoda, M.Matsui, Effect of surface tension on welding phenomena in GMA welding, *Preprint of the National Meeting of JWS*, No. 50 (1992, April), P.144-145
- 13) T.Shinoda, H.Ono, Entwicklung eines Metallaktivgas Engspaltschweissverfahrens mit negativer Polung der Drahtelektrode, *Schweissen und Schneiden*, 44(1992), No.9 P.485-488
- 14) H.Miyazaki, T:Shinoda, Prevention of puckering using double wire MIG welding process *J. of Light Metal Welding & Construction* 30(1992), No.12 P.655-663

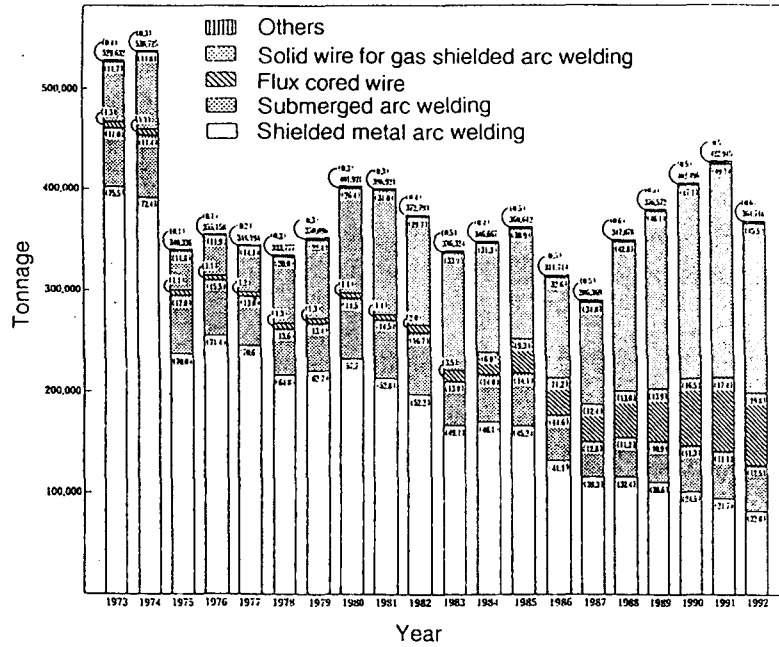


Fig. 1 Annual production of welding consumables for steel construction
() shows relative ratio in %

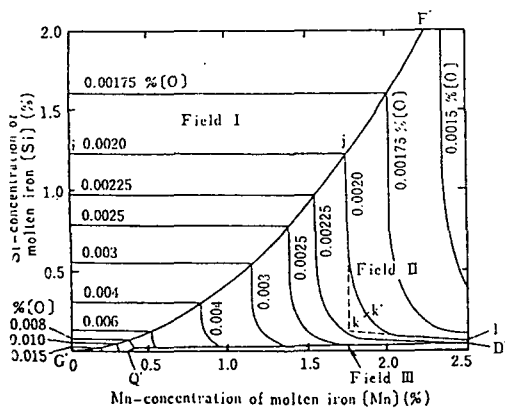


Fig. 2 Relation among oxygen-, manganese- and silicon-concentrations of molten iron in the state of equilibrium at 1510°C

Note: Straight lines in Field I and curves in Field II show iso-oxygen-concentration lines.

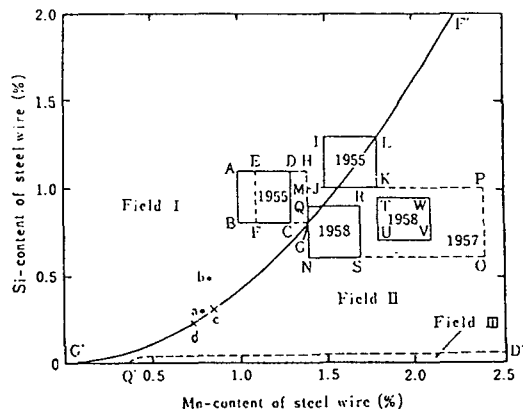


Fig. 3 Change in composition range of CO₂ arc welding steel wires in USSR

- Notes:
- (1) Suslov (1955); ABCD (for cast steel or killed steel)
Suslov (1955); EFGH (for rimmed steel)
Novojilov (1955); IJKL
Nobojilov (1957); MNOP
S. U. Norm Ty 2-57 (1958); QNSR
S. U. Norm Ty 2-57 (1958); TUVW
 - (2) rectangle; composition range of steel wire
4-place numeral: year
Shift of composition range to below G'F' in recent years is seen.
 - (3) ● — weld steel obtained from steel wire QNSR
× — weld steel obtained from steel wire TUVR

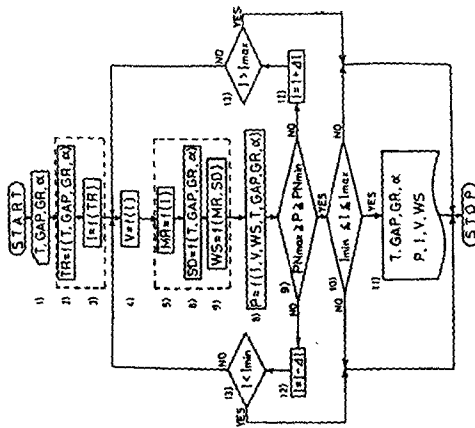


Fig. 4 Flowchart of calculation of CO₂ welding parameters of V-Butt one pass joint
Table shows the results of calculation to achieve full penetration
Equations and list of symbols are summarized

Table 1 V-butt one pass CO₂ arc welding parameters

| Plate thickness (mm) | Welding speed (cm/min) | Welding current (A) | Welding voltage (V) | Welding efficiency (%) | | | | | |
|----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
| 1 | 3.0 | 3.1 | 0.0 | 2.5 | 4.0 | 3.1 | 2.78 | 3.8 | 4.5 |
| 2 | 3.0 | 4.4 | 0.4 | 4.5 | 3.0 | 3.1 | 4.68 | 3.5 | 4.5 |
| 3 | 12.0 | 12.7 | 0.0 | 4.5 | 7.0 | 4.2 | 9.17 | 3.7 | 3.3 |
| 4 | 8.0 | 8.5 | 0.0 | 6.0 | 4.0 | 3.7 | 4.85 | 3.5 | 4.4 |

Cross sectional area of reinforcement

- $P_{max} = 0.14 \cdot GR \cdot \tan(\alpha/2)$ (1)
 - $P_{max} = 1.975 \cdot GAP$ (2)
 - $TR = T - 0.14 \cdot GR \cdot \tan(\alpha/2) - 1.975 \cdot GAP$ (3)
 - $WS = 12.18 \cdot MR / SD$ (4)
 - $SR = 3.6 \cdot T$ (5)
 - $SD = 3.6 \cdot T + GR \cdot \tan(\alpha/2) + T \cdot GAP$ (6)
 - $P_1 = 0.104 \cdot \sqrt{TR \cdot WS \cdot W} - 1.66$ (7)
 - $P = 0.104 \cdot \sqrt{TR \cdot WS \cdot W} - 1.66 + 0.14 \cdot GR \cdot \tan(\alpha/2) + 1.975 \cdot GAP$ (8)
- DE : Deposition efficiency (%)
 DIA : Wire diameter (mm)
 EXT : Distance between tip and base metal (mm)
 GAP : Root gap (mm)
 GAP_{max} : Maximum root gap (mm)
 GR : Groove depth (mm)
 I : Welding current (A)
 I_{max} : Maximum welding current (A)
 I_{min} : Minimum welding current (A)
 MR : Wire melting rate (g/min)
 P : Penetration depth (mm)
 P₁ : Needed penetration depth (mm)
 P₂ : Gross-sectional area of deposited metal (mm²)
 SR : Gross-sectional area of reinforcement (mm²)
 SG : Gross-sectional area of groove and root gap (mm²)
 T : Plate thickness (mm)
 TR : Reduced plate thickness (mm)
 V : Arc voltage (V)
 WS : Welding speed (cm/min)
 α (ALPHA) : Groove angle (deg)
 ρ (RHO) : Density of weld metal (g/cm³)

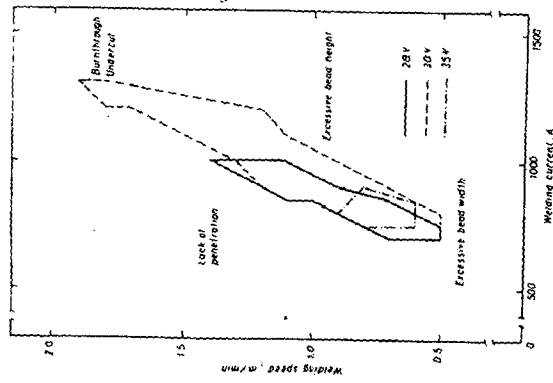


Fig. 6 Procedure tolerance for submerged arc welding of butt joints in 12.7mm steel plate with 5mm diameter electrode (DCEP welding)

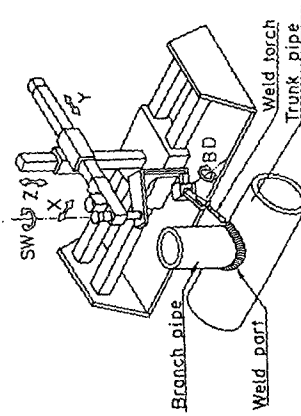


Fig. 5 Example of application to boiler drum assembly using robot system controlled by computer simulation processing

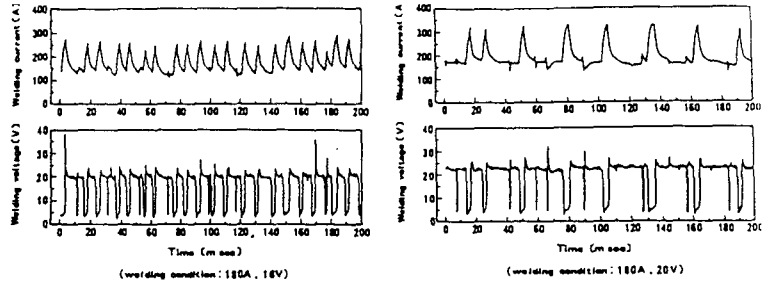


Fig. 7 Typical waveforms of welding current and voltage using commercial wire with low and high arc voltage regions

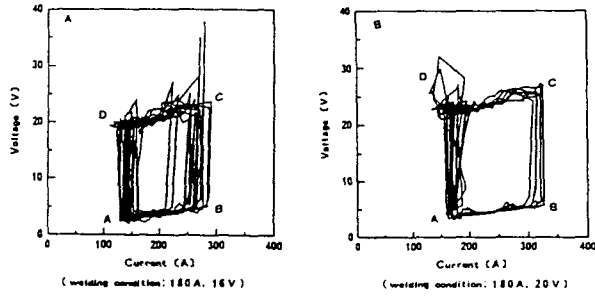


Fig. 8 Typical current and voltage diagram using commercial wire with low and high arc voltage regions shown in figure 7

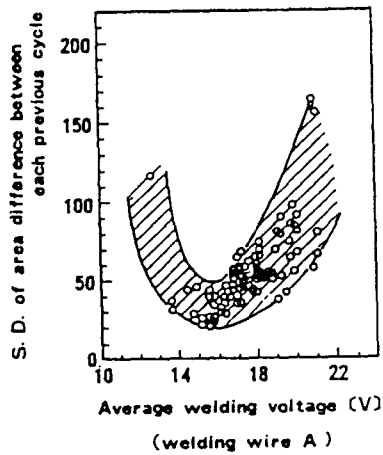


Fig. 9 Effect of average welding voltage on standard deviation of area difference between each previous cycle

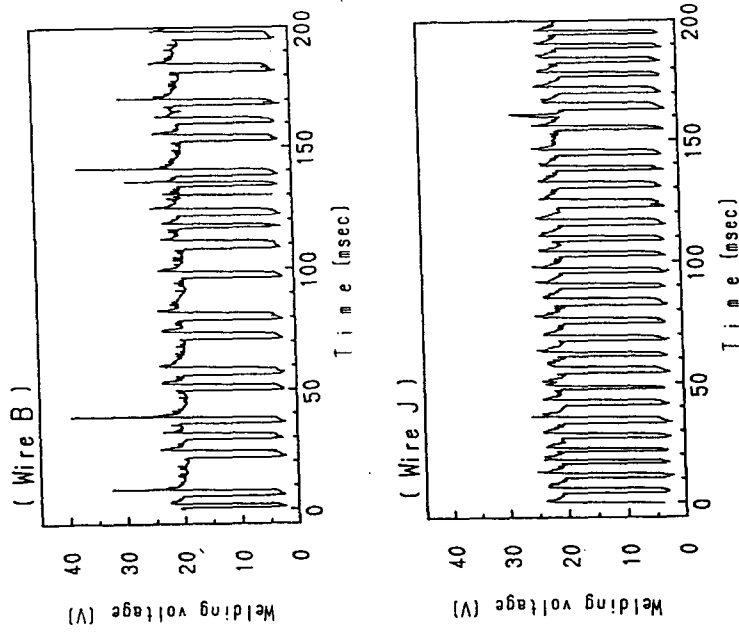


Fig. 10 Typical waveforms of arc voltage using commercial wire, B with high surfacetension and laboratory made wire, J with lower surfacetension
 Note: Welding volt: 18V, Welding current: 180A

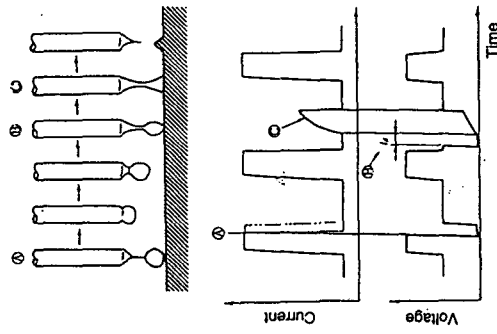


Fig. 11 Welding current wave control for MAG welding process called synchronized short circuiting control
 A: Current control at short circuiting transfer
 B: Instantaneous current control at short circuiting transfer
 C: Control by electro-reactor

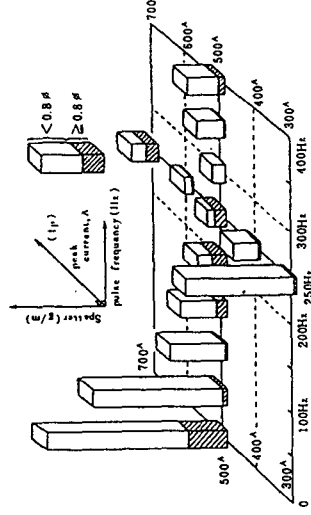


Fig. 12 Relationship between spatter loss and pulse conditions for Ar-2.4%O₂-20%CO₂ shielding gas composition
 ϕ: denotes particle diameter

| Chemical compositions (mass%) | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------------------|-------------------------------------|
| | C | Si | Mn | S+S _e | $\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}^2$ |
| Wire B | 0.03 | 0.87 | 1.42 | 0.019 | 1200 |
| Wire J | 0.04 | 0.84 | 1.33 | 0.100 | 800 |
| Wire X | 0.05 | 0.51 | 0.96 | 0.018 | 1110 |

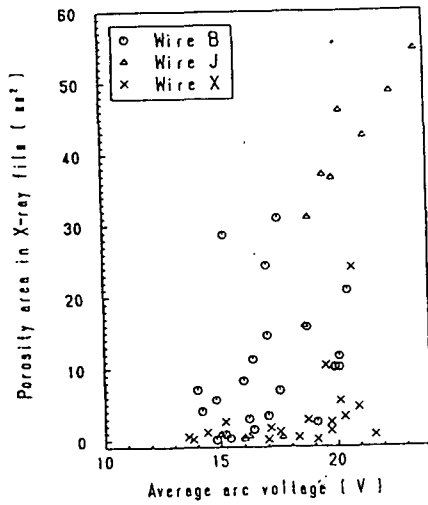


Fig. 13 Effect of arc voltage on porosity formation in case of Zn plated steel welds
Chemical compositions are listed in Table

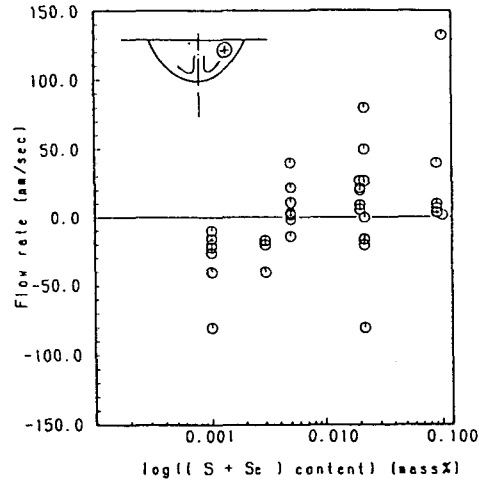


Fig. 14 Effect of Se+S contents on molten metal flow rate and directions

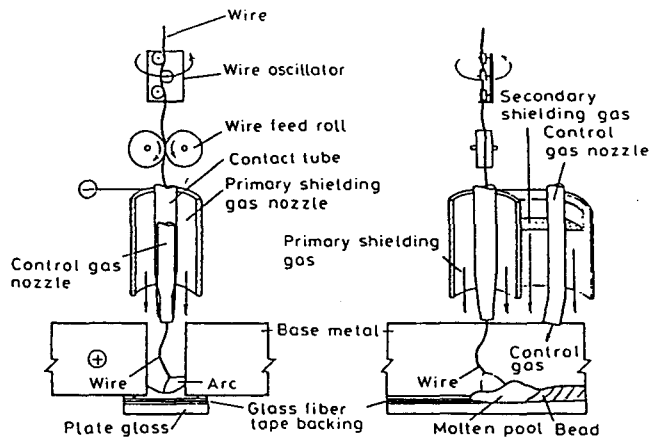


Fig. 15 Principles of DCEN MAG narrow gap welding process