

<論 文>

鎔接質 向上을 위한 抵抗 點熔接工程의 制御器 開發에 관한 研究

張 熙 碩* · 趙 榮 錫**

(1989년 8월 14일 접수)

A Study on Weld Quality Controller for Resistance Spot Welding Process

Hee Seok Chang and Hyung Suck Cho

Key Words : Resistance Spot Welding(抵抗 點熔接), Welding Process Control(熔接工程制御), Self-Learning Control(學習制御), Weld Quality Control(熔接質 制御), Nugget Size(熔融部 크기)

Abstract

The resistance spot welding process has been used extensively for joining of sheet metal, which is subject to many process parameter variation. Among many process variables associated with the welding process, electrode movement was found to be indicative of the weld quality and adequate for weld quality control. To achieve a uniform weld quality, this study presents a self-learning control system that utilizes the electrode movement as a process variable. The control algorithm was implemented to the actual spot welder with a micro-computer. The performance of this control system was evaluated through real-time compensation of the shunt effect. The superiority of this control system over the conventional feedback control system was experimentally examined and discussed in detail.

i. 序 論

抵抗 點熔接은 1877년 Elihu Thomson에 의해 發明된 熔接工程으로 두 金屬板을 電極사이에 놓고 壓力을 가하면서 0.5초 内外의 짧은 시간에 數千암페어의 큰 電流를 흘려 金屬板 사이의 接觸抵抗을 이용하여 ジュール(Joule) 熱을 발생시켜 熔融部가 형성되도록 하는 電氣 抵抗熔接의 일종이다. 보통 熔接質(weld quality)은 引長-剪斷 強度(tensile-shear strength)와 比例하는 熔融部(nugget)의 크

기로 나타낸다. 點熔接은 짧은시간에 熔接電流, 電壓, 電極 加壓力, 熔接材料의 表面狀態 및 電極의 變形狀態 등의 熔接 工程變數들이 서로 聯關되어 발생시키는 熔接材料의 彈-塑性 變形 및 相變化(phase transformation)가 隨伴되는 熱物理的 現象(thermophysical phenomenon)이므로 各 熔接변수의 微細한 變化에 敏感하여 熔接質 制御(weld quality control)가 매우 어렵다. 또한 아크 熔接과 달리 熔融部가 露出되지 않기 때문에 破壞檢査 이외에는 熔接質을 알 수 있는 確實한 方法이 없다. 그런데 破壞檢査는 標本抽出(sample base)方式이므로 限界性이 있는 바 熔融部 형성과정을 포함한 熔接진행 과정을 잘 나타내주는 熔接變數(process parameter)의 考察을 통해 熔接狀態를 把握하는

*正會員, 明知大學教 工科學 機械工學科

**正會員, 韓國科學技術院 生産工學科

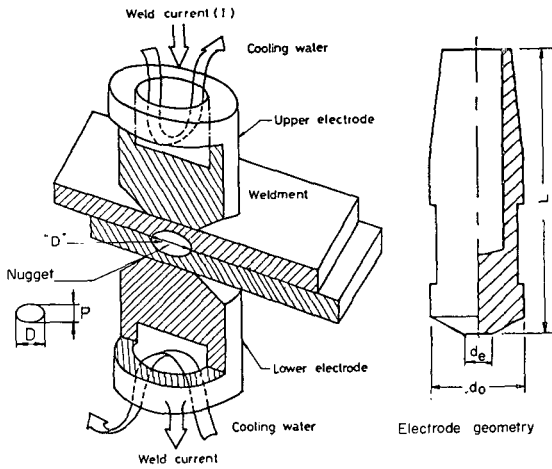


Fig. 1 Schematic diagram of spot welding system and electrode geometry

것이 일반적이다(Fig. 1 참조).

현재 産業現場에서는 作業者의 經驗에 의해 鎔接電流와 電極의 加壓力을 조절하여 鎔接을 遂行하는 방식이 대부분 채택되고 있다. 그런데 작업속도가 迅速하여 大量生産에 주로 이용되는 環境에서 電極의 磨滅(wear) 및 分流效果(shunt effect) 등의 外亂(disturbance)으로 해석될 수 있는 鎔接質의 沮害要因이 발생할 경우에는 현재의 鎔接方式으로는 多量의 不良 鎔接結果가 不可避한 실정이다.

鎔接進行狀態를 비교적 잘 나타내주는 動 抵抗(dynamic resistance)이나 電極分離現象(electrode movement)을 이용하면 前述한 外亂(disturbance)效果가 鎔接質 미치는 영향을 분석할 수 있고 不良 鎔接結果를 感知(monitors) 할 수 있고 그 結果에 따라 鎔接計劃(weld schedule)을 修整할 수 있다. 현재의 鎔接方式에서는 電極의 磨滅가 심할 경우에는 磨滅된 電極을 研磨(dressing)하여 다시 裝着시키고, 分流效果(shunt effect)를 피할 수 없을 때는 鎔接電流를 增加시키는 방법이 있지만 生産性 向上의 觀點에서는 만족할만한 結果를 기대할 수 없다. 作業者가 手動으로 경우에 따라 鎔接變數를 調節하기는 現實적으로 불가능하고 鎔接變數(process parameter)를 통한 感知(monitors) 뿐만 아니라 그 結果에 따라 적절한 制御動作(control action)을 自動적으로 遂行할 수 있는 進歩된 鎔接制御裝置의 開發이 시급한 실정이다.

鎔接質 沮害要因을 제거하여 요구되는 均一한 鎔

接質을 얻기 위한 抵抗點 鎔接工程의 制御에 관한 연구가 많이 進行되었다^(2-4, 8-11). Wood 등⁽²⁾과 Kuchar 등⁽⁸⁾의 연구는 엄밀한 의미에서 피드백 制御 시스템으로 보기 어려운 수많은 鎔接材料에 관한 資料, 鎔接變數와 실제 鎔接質 사이의 經驗式등을 기초로한 heuristic control 시스템으로서 尙大한 豫備實驗의 資料가 先行되어야 한다는 限界性이 있다. Cho⁽³⁾와 Chang⁽⁴⁾의 연구에서는 비교적 간단한 피드백 制御 시스템으로 分流效果(shunt effect)와 電極의 磨滅現象에 基因한 鎔接質 沮害要因을 補償할 수 있었으나 鎔接工程의 動的 모델(dynamic model)에 基礎하지 않은 制御器 設計方式이므로 制御 利得(gain)을 選定하기 위한 施行錯誤인 豫備實驗이 역시 필요했고 經驗적으로 選定된 制御 利得값 부근에서만 만족할 만한 結果가 얻어졌다. 抵抗點 鎔接工程의 單純化된 모델⁽¹⁰⁾과 數值모델⁽¹¹⁾에 基礎한 制御器 設計에 관한 연구에서는 最適制御의 觀點에서 制御器를 設計할 수 있었으나 모델이 鎔接工程의 熱的 舉動(thermal behavior)만을 糾明할 수 있어서 熔融部 부근의 彈-塑性 變形까지 隨伴되는 點 鎔接 工程特性의 觀點에서 그리 만족스럽지 못하다.

본 연구에서는 鎔接途中 발생할 수 있는 鎔接質 沮害要因을 電極分離現象을 측정하여 把握하고 鎔接 熱入力에 해당하는 鎔接電流를 學習制御方式(self-learning control)에 의하여 컴퓨터와 周邊機器(interface)를 통해 조절함으로써 요구되는 均一한 鎔接質이 항상 保障되도록 하였다. 여기서 學習 制御方式을 채택한 이유는 制御하고자 하는 對象의 動的 모델(dynamic model)이 없어도 制御器 利得의 選定이 비교적 자유롭고 鎔接 制御裝置가 自體的으로 感知(monitors)한 신호로 判斷하여 制御動作을 取함으로써 鎔接時 蓄積되는 情報(data)가 鎔接機에 一種의 知能을 賦與할 수 있어서 進歩된 概念의 鎔接制御裝置 開發의 可能性을 檢討해 보기 위함이다.

실제 鎔接工程에서 外亂(disturbance)效果로 해석될 수 있는 鎔接電壓의 變動, 電極 加壓力의 變動, 電極의 磨滅, 分流效果(shunt effect) 등의 現象은 熔融部로 흐르는 有效電流의 變動을 惹起시켜 鎔接質을 低下시킨다^(1, 4, 6, 7, 9). 이러한 現象은 電極分離現象(electrode movement)을 측정함으로써 확인할 수 있었고 前述한 制御動作을 鎔接機에 加하여 鎔接工程制御를 遂行할 경우 外亂效果가 충분히 補

償(compensation)됨을 역시 電極分離現象 (electrode movement)을 측정함으로써 熔接 制御裝置의 性能이 評價되었다. 또한 熔接變數인 電極分離現象을 통하여 나타난 制御裝置의 性能을 확인하기 위하여 실제 熔融部의 크기를 熔接試片의 組織檢査를 통해 측정하였고 보통 사용되는 熔接方式와 본 연구에서 提案한 熔接制御方式의 차이점을 糾明하였다.

높은 信賴度 및 生産性的의 向上이 熔接關聯 産業現場의 時急한 문제이고 로봇(robot)關聯 分野와 마찬가지로 人工知能을 가진 進歩된 概念의 熔接裝置開發이 요구되는 趨勢를 고려하여 본 研究結果의 應用可能性을 또한 論하였다.

2. 熔接 制御시스템의 構成

Fig. 2에는 본 연구에서 構成한 電極分離 신호를 利用한 熔接工程의 監視 및 制御시스템이 圖示되어 있다.

(1) 抵抗 點熔接機(resistance spot welder)

사용된 熔接機는 空氣壓作動式(air spot welder)으로 容量은 50kVA이다. 이 熔接機는 空氣壓調整機(pressure regulator)가 附着되어 있어 電極의 加壓力을 調節할 수 있고 squeeze cycle, weld cycle, hold cycle등을 各各 調整할 수 있다. 熔接電流의 調整은 SCR firing angle을 SCR driver를 통해 調節함으로써 可能한데 본 연구에서는 熔接電流의 實時間(real-time) 制御가 可能하도록 IBM AT 컴퓨터의 D/A 變換機(converter) 出力신호로 SCR의 firing angle 調節이 可能하게 改造하였다. 入力 電源은 單相 220V 60Hz이다.

(2) 電極(electrode)

Fig. 1에 圖示된 電極은 mild steel, low-alloy steel, stainless steel, low conductivity brass 및 nickel 合金등의 抵抗 熔接에 適合한 RWMA Class II에 해당하는 材質인 Cu-Cr棒을 tapered-

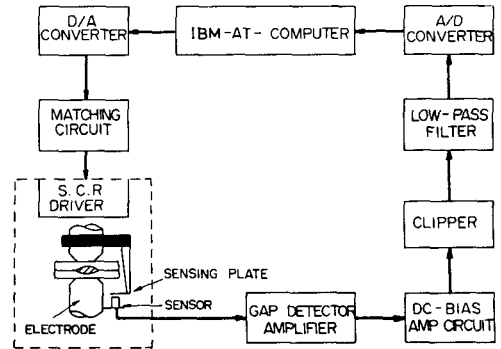


Fig. 2 Electrode movement monitoring and control system

flat한 모양으로 加工하여 사용하였다(Fig. 1: $d_e=5\text{mm}$, $d_o=16\text{mm}$, $L=50\text{mm}$).

(3) 熔接試片(workpiece)

1.6mm두께의 冷間 壓延鋼板를 사용하였고 組織成分 檢査結果는 Table 1에 表示되어 있고 크기는 75mm×25mm로 切斷하여 熔接하였다.

(4) 變位 測定器(gap sensor)

電極分離現象을 측정하기 위한 變位 測定器는 渦電流(eddy current)效果를 이용하는 非接觸型 거리 측정 장치로서 Ono-sokki社의 VS-021이고 增幅器가 있어 0~2mm의 區間이 線型的으로 效力되는 DC 電壓을 통해 측정할 수 있다.

(5) Weld Checker

熔接도중 電極兩端에 加해지는 電壓, 電流, 動抵抗은 Miyachi社의 모델 MM-502A weld checker로 측정하였다. 여기에서 電流는 toroid coil로, 電壓은 電極兩端에 달린 電壓端子(voltage pick-up)로 측정되며, 60Hz의 각 half cycle의 平均값이 演算되어 出力된다.

이상의 各 裝置를 종합적으로 살펴보면 變位 測定器와 測定器앰프에서 出力되는 電極分離現象의

Table 1 Chemical composition of weldment. unit : Wt(%)

C	Mn	P	S	Cu
0.038-0.14	0.38-0.44	0.006-0.014	0.004-0.019	0.01-0.02

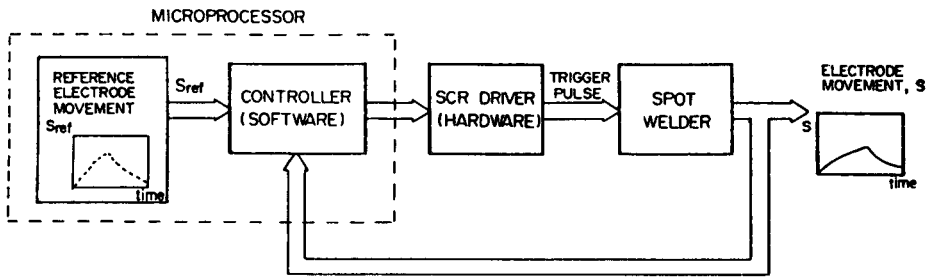


Fig. 3 Block diagram of the electrode movement control system

신호(signal)는 DC bias 앰프를 거치면서 A/D 變換機(converter)에 適當한 電壓(voltage)으로 增幅되고 bias 된다. 雜音(noise)은 30Hz cut-off frequency의 低域濾터(low-pass filter)로 除去되면서 12 bit A/D 變換機로 流入된다. IBM PC/AT에서 필요한 演算過程을 거쳐 요구되는 制御動作이 D/A 變換機 出力으로 SCR driver에 보내져서 熔接電流의 實時間 制御가 可能하다. 또한 電極兩端의 電壓, 電流는 weld checker를 통하여 역시 A/D 變換機로 샘플링되어 鎔接工程이 感知(monitring)된다⁽⁴⁾.

실제 熔接工程 制御시스템은 Fig. 3에 概略으로 圖示되어 있다. 前述한 신호처리시스템(signal processing system)을 基礎로 電極分離 신호(electrode movement, S)를 工程變數(process variable)로 샘플링하여 이미 컴퓨터 메모리에 貯藏되어 있는 良好한 熔接狀態를 나타내는 基準電極分離 신호(S_{ref})와 比較하여 그 差異量(error)에 基礎한 制御動作을 컴퓨터에 內裝된 소프트웨어에 의해 熔接機에 加하므로써 熔接質을 低下시키는 外亂(distrubance) 效果가 熔接途中 流入되어도 實時間 補償을 할 수 있는 方式이다.

3. 熔接工程 制御器 設計

熔接작업 現場에서 電極의 磨滅 및 分流效果(shunt effect)는 熔接質을 나쁘게 하는 가장 대표적인 外亂으로 해석될 수 있다. 磨滅된 電極을 사용하면 熔接시편과 電極의 接觸面積이 점차 넓어져 熔融部로 흐르는 熔接電流의 密度가 낮아져 충분한 熔融이 일어나지 못하여 요구되는 熔融部(nugget)의 크기가 얻어질 수 없다⁽⁴⁾. 또한 分流效果(shunt effect)는 이미 熔接된 熔融部로 熔接電流가 分流

(shunt)되므로 역시 有效電流 密度가 낮아져 충분한 熔融이 일어날 수 없다. 본 연구에서는 前述한 外亂效果를 熔接制御시스템이 補償(compensation)할 수 있도록 制御器를 反復學習制御方式으로 설계한다.

Fig. 2에 圖示된 制御시스템의 H/W를 기초로 한 Fig. 3에서 볼 수 있는 블록 線圖의 制御 알고리즘(software)은 다음과 같다. 본 연구에서 채택한 制御 알고리즘은 學習制御(self-learning) 방식이고 Fig. 5에 도시되어 있다. 良好한 熔接狀態(RWMA에서 추천한 熔接條件에서 外亂效果가 없을 때 熔接 되는 狀態를 의미함)에서 샘플링된 電極分離 신호를 $S_d(=S_{ref})$ 라 하고 전술한 熔接質 沮害要因인 電極磨滅 또는 分流效果(shunt effect)가 발생했을 境遇의 不良 熔接狀態가 샘플링된 電極分離 신호, S를 통해 확인될 수 있고 k 번째 鎔接에서 S_k 로 샘플링된다면 S_d 와의 誤差(error)가 다음식으로 표시된다.

$$e_k(t) = S_d(t) - S_k(t) \quad (1)$$

熔接횟수 k 가 증가함에 따라 S_k 가 S_d 에 접근하면서 熔接施行이 계속될 수록 外亂에 의해 惹起된 不良 熔接狀態가 改善되어서 원하는 熔接狀態에 도달하려면 식 (1)으로 표시된 誤差를 이용하여 다음 $k+1$ 번째의 熔接 熱入力 u_{k+1} 이 調節되어야 한다. 보통 로봇 制御에서 출발한 Arimoto rule⁽¹²⁾은

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma \frac{d}{dt} e_k(t) \quad (2)$$

으로 表示되나 熔接工程에서는 높은 熔接電流 때문에 測定變數에 雜音(noise)이 실려있으므로 誤差 e_k 를 微分하여 熔接 熱入力 u_{k+1} 을 구하면 入力에 너무 큰 變動(fluctuation)이 惹起되므로 식 (2)는 적당하지 못한 것이 判明되어 Arimoto rule을 修整하여 다음의 學習制御 알고리즘을 採擇하였다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Phi e_k(t) + \Gamma \frac{d}{dt} e_k(t) \quad (3)$$

여기서 Φ , Γ 는 각각 學習制御에서의 比例, 微分利得(gain)이다. 식 (3)의 反復學習制御(iterative self-learning) 알고리즘을 Fig. 5와 같이 실제 點熔接裝置에 具現(implement)시킨다. Fig. 5에서 點熔接工程은 未知의 動的모델(unknown dynamics)을 가진 블록으로 표시되어 있다. 抵抗 點熔接의 모델링(modeling)은 제1장에서 前述한 바와 같이 複雜한 여러가지 메카니즘이 서로 聯關되어 있는 熱物理的 現象(thermophysical phenomenon)이므로 현재까지 點熔接 制御器의 構造 및 利得(gain)을 選定하기 위한 動的 모델은 개발되어 있지 않다^(2-4,6-9). 抵抗 點熔接의 數值 모델(numerical model)을 設定하여 最適制御(optimal control)의 觀點에서 制御器의 利得을 선정한 연구⁽¹¹⁾와 단순화된 近似모델(approximate model)을 이용한 연구⁽¹⁰⁾가 보고되고 있다. 본 연구에서는 시스템의 動的 모델이 糾明되지 않은 狀態에서 學習制御 이득 Φ , Γ 를 選定하여 學習制御器의 性能을 評價해 본다.

4. 實驗方法

4.1 電極分離 신호를 이용한 熔融部 크기의 推定實驗

熔接電流가 흐르기 시작하면 두 金屬板사이의 接觸抵抗에 의해 생긴 熱로 인하여 金屬板은 熱膨脹을 일으키고 따라서 電極은 서로 벌어지도록 힘을 받아 멀어진다. 이러한 현상은 熔融部가 성장하여 熔融部주위의 塑性域이 擴張하면서 電極의 加壓力을 支撐할 수 있을때 까지 계속된후 熔融部가 더 성장하면 反對쪽으로 陷入(embedding)이 일어나 電極은 가까워지게 된다^(3,4,7,8). 즉 電極分離現象은 실제 熔接部位에 가해진 熱에너지에 의해 형성된 熔融部의 크기에 대한 중요한 工程變數(process parameter)이므로 體系的인 實驗을 통하여 電極分離 신호를 分析함으로써 熔融部 크기의 推定을 試圖한다.

熔接材料 試片의 두께를 1.0mm~2.0mm까지 변화시키고 電極 加壓力은 240kgf, 360kgf, 480kgf로 熱入力는 3kW, 4kW, 5kW로 각각 변화시키며 각 條件에서 10개의 熔接試片을 反復實驗을 하여 얻는다. 이때 電極分離 신호도 컴퓨터에 入力되어 波形

을 分析한다. 熔接된 試片은 金屬組織 檢査用 切斷機(cutter)로 中央 熔接部를 切斷하여 마운팅 作業을 거친 後 砂布(sand paper; #220~#1200)로 폴리싱 한 後 3 μ m 알루미늄으로 폴리싱한다. 폴리싱이 끝난 熔接試片은 5% Nital 溶液으로 30초간 etching한 後 斷面에서의 熔融部(nugget) 크기를 Greather Scientific Co.의 Tool Maker's Microscope로 測定한다.

4.2 分流效果(Shunt Effect)에 따른 電極分離 신호의 變化測定實驗

Fig. 4에서 이미 熔接된 부근에 다시 熔接할때 발생하는 分流效果(shunt effect)를 圖示하였다. 첫 번째 熔融部를 통하여 두 번째 熔融部가 형성될때 필요한 熔接電流의 一部가 分流되므로 이 效果는 熔融에 필요한 有效電流를 감소시켜 熔接質을 低下시킨다⁽⁹⁾. 이러한 現象은 熔接變數인 電極分離 신호를 통하여 感知(monitring)가 可能할 것이므로 shunt spacing을 10mm와 20mm로 變化시키며 電極分離 신호를 測定한다.

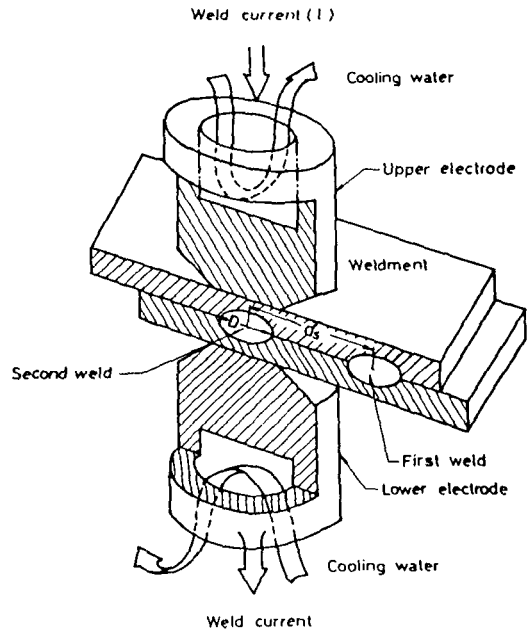


Fig. 4 Schematic diagram of spot welding process in the presence of shunt effect (shunt spacing = d_s)

4.3 制御實驗

電極磨滅에 관한 연구⁽⁴⁾와 分流效果(shunt effect)를 糾明한 연구^(3,11)에 의하면 두 경우 공통적으로 熔融部 形成에 필요한 熱入力(heat input)이 부족하여 요구되는 熔融部보다 작아지는 결과가 얻어진다. 본 연구에서는 이러한 外亂效果를 制御 시스템이 反復學習制御 方式으로 어느 정도 補償할 수 있는 가를 알아보기 위해 다음과 같이 實驗을 進行한다. 銲接熱入力이 銲接途中 3kW로 一定하게 加해지므로 調整한 後 銲接을 施行하며 測定되는 電極分離신호를 샘플링하여 컴퓨터의 메모리에 저장시킨다(Fig. 5의 S_d). 電極磨滅나 分流效果(shunt effect)가 銲接工程에 外亂으로 작용할 때는 熔融部에 흐르는 有效電流가 減少하며 減少量은 電極의 磨滅狀態, shunt spacing(Fig. 4)에 따라 변한다. 따라서 본 實驗에서는 일정한 外亂效果를 實驗으로 具現시키기 위해 磨滅되지 않은 電極을 分流效果(shunt effect)가 일어나지 않도록 銲接을 施行하되 銲接 熱入力を 2kW로 減少시켜 첫번째 施行 熱入力으로 取한다. 즉 $u_0=2kW$ 로 銲接하며 샘플링된 電極分離신호 S_0 에서 식 (3)의 學習制御 알고리즘으로 u_1 을 구하여 銲接하며 다시 S_1 이 샘플링되면 식 (3)에서 u_2 가 구해지며 S_k 가 S_d 에 近接할 때까지 反復적으로 學習制御에 의한 銲接 工程制御를 試圖한다(Fig. 5). 이때 銲接變數 S_k 를

통해 나타난 銲接狀態의 改善過程 즉, 外亂의 補償過程을 실제 銲接質을 조사하여 確認한다. 銲接質로 보통 해석되는 熔融部(nugget)의 크기를 k 번째 銲接時 銲接試片을 取하여 組織檢査過程을 거쳐서 測定한다. 또한 反復學習制御의 收斂性能(convergence performance)을 理論적으로는 시스템 動的 모델이 없어 不可能하므로 實驗적으로 糾明해 본다.

本 實驗에서의 銲接條件은 다음과 같다.

welding cycle=16cycle

電極 加壓力(electrode force)=360kgf

squeeze cycle=60 cycle

hold cyle=60 cycle

5. 實驗結果 및 討議

5.1 電極分離신호를 이용한 熔融部 크기의 推定實驗 結果

여러 銲接條件에서 구해진 電極分離(electrode movement) 신호파형이 Fig. 6에서 9가지 圖示되어 있다. Fig. 6(a)에서 銲接 熱入력이 5kW로 충분한 경우(파형 a)에는 熔融部 加熱로 인한 熱膨脹이 電極의 加壓力을 支撐하며 계속되어 약 0.12mm까지 도달하면 熔融部가 擴散되어 熔融部 周圍가 軟化(softening)되며 電極 加壓力을 支撐할 수 없기 때문에 陷入(embedding)現象을 일으키며 銲接이 끝나게 된다. 熱入력이 부족한 3kW(파형 c)일 경우는 銲接이 끝날때 까지 충분한 熔融이 일어나지 못하여 熱膨脹 現象만 支配적으로 일어난다. 電極의 加壓力이 360kgf[Fig. 6(b)]에서 480kgf[Fig. 6(c)]로 증가할 경우에도 電極分離신호의 最高點의 크기만 달라지고 전체적인 銲接 熱入力에 대한 傾向은 Fig. 6(a)와 類似함을 알 수 있다. 銲接試片의 두께가 1mm인 경우는 Fig. 8과 Fig. 9에 圖示되어 있다. Fig. 8(a)에서 熱入력이 충분한 경우(파형 a)와 부족한 경우(파형 c)의 電極分離신호 파형이 Fig. 6의 경우와 類似함을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 파형을 電極 加壓力에 따른 傾向을 把握하기 위해 다시 再配置한 것이고 Fig. 9는 Fig. 8을 같은 방법으로 再配置한 結果이다.(단, Fig. 6~Fig. 9의 weld cycle은 60Hz의 half cycle을 의미한다.)

위의 結果를 考察해 보면 電極分離신호의 파형

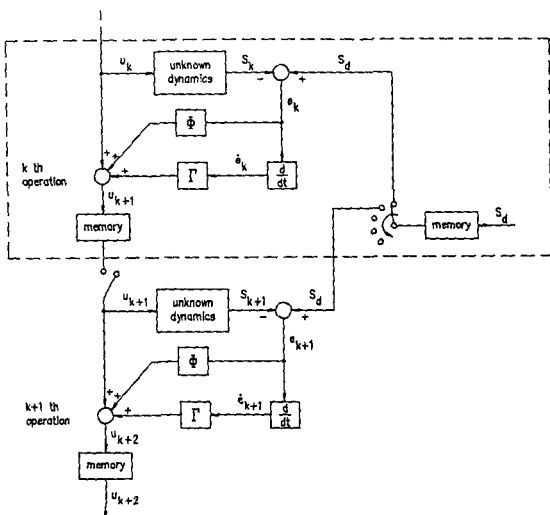
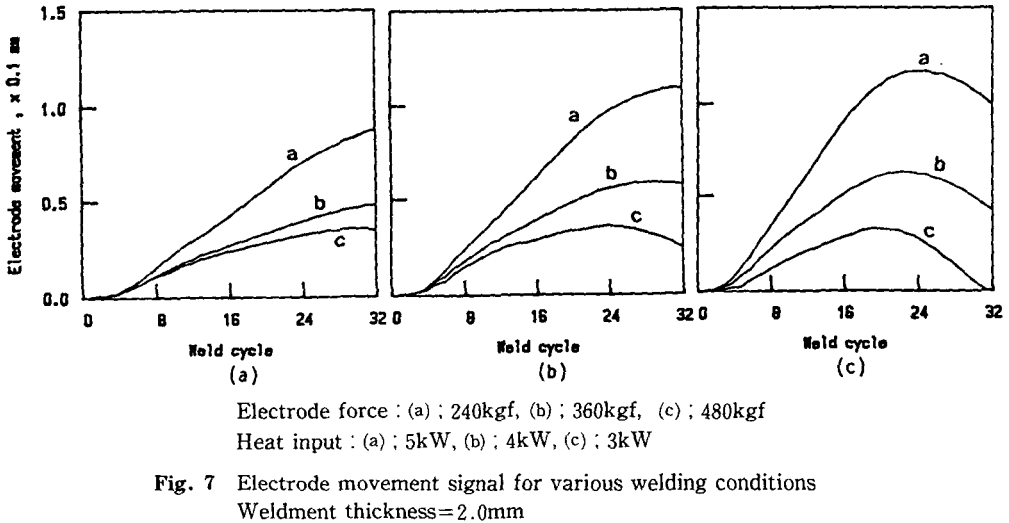
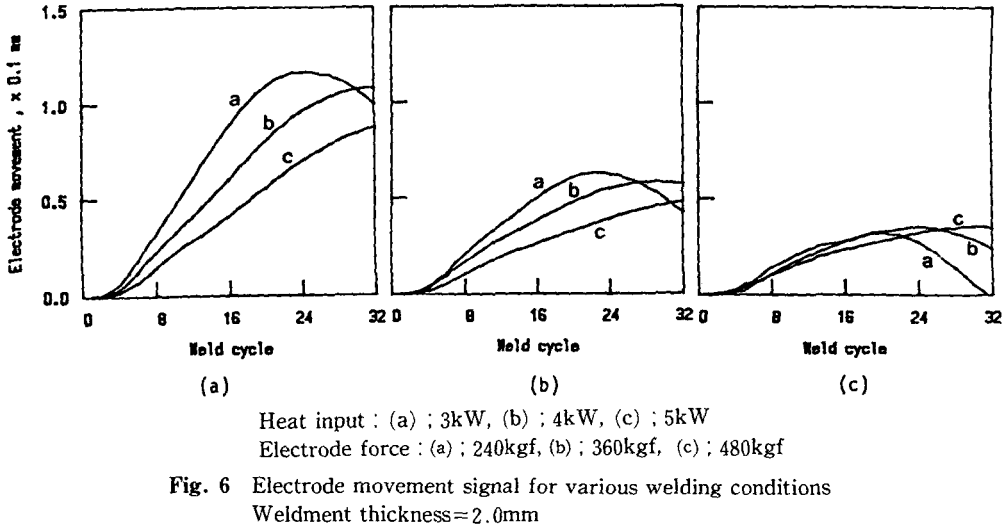
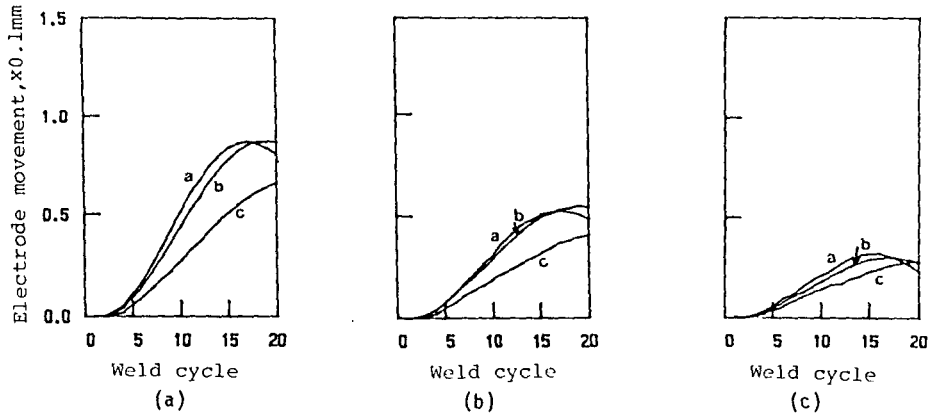


Fig. 5 Self-learning control system for resistance spot welding process



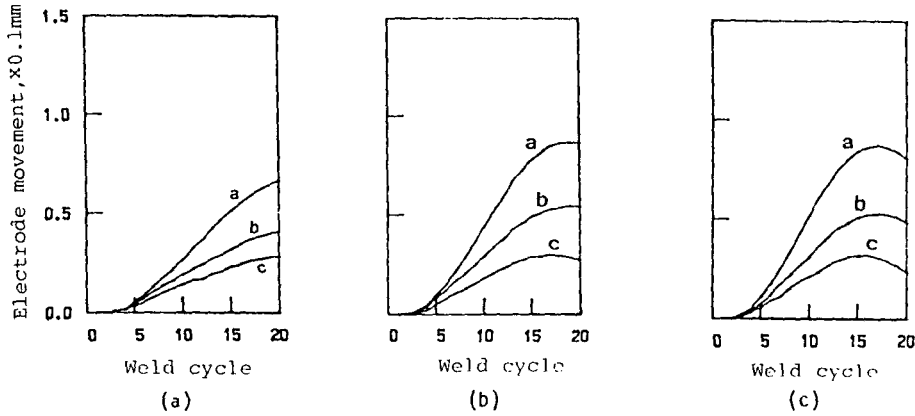
(shape)은 실제 용접部位에 가해진 熱 에너지와 그 結果 형성된 熔融部(nugget)의 크기에 대한 중요한 情報이므로 電極分離 신호의 파형으로부터 熔接質을 推定할 수 있을 것이다. 熔接 초기의 電極分離 신호의 增加率(rate of rise)과 熔融部 크기에 대한 相關關係가 연구⁽³⁾에 구해져 있으나 廣範圍한 熔接變數의 範圍에서는 성립하지 않으므로 본 연구에서는 電極分離 신호 파형 $S(t)$ 를 시간에 대한 여러 函數의 組合으로 數學的 모델을 設定한 결과는 다음과 같다.

$$S(t) = e^{-pt}(C_1 + C_2 t) \sin \omega t \quad (4)$$
 여기서 t 는 鎔接시간이고 ω, p, C_1, C_2 는 파라메터(parameter)이다. 실제 熔接時 구해진 $S(t)$ 를 식 (4)의 函數로 非線形 最少自乘(nonlinear least square)方法으로 커브피팅하였고 4개의 파라메터들은 數值的으로 Rosenbrock 알고리즘을 사용하여 最適化하여 구했다. C_2 는 $S(t)$ 의 增加率(rate of rise)에 支配的인 영향을 미치고 p, ω 는 $S(t)$ 가 最大값에 도달하는 점과 그 이후의 파형을 주로 결정함을 알 수 있다. 各各의 파라메터들이 구해진 熔



Electrode force : (a) ; 240kgf, (b) ; 360kgf, (c) ; 480kgf
Heat input : (a) ; 4.5kW, (b) ; 4kW, (c) ; 3kW

Fig. 8 Electrode movement signal for various welding conditions
Weldment thickness=1.0mm



Electrode force : (a) ; 240kgf, (b) ; 360kgf, (c) ; 480kgf
Heat input : (a) ; 3kW, (b) ; 4kW, (c) ; 4.5kW

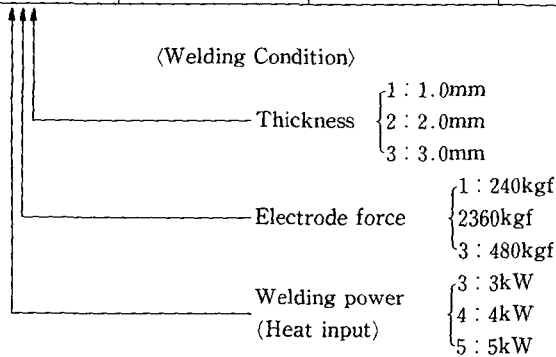
Fig. 9 Electrode movement signal for various welding conditions
Weldment thickness=1.0mm

接條件에서 실제 熔接試片의 組織檢査결과 구해진 熔融部(nugget)의 斷面의 크기[diameter(D)와 penetration(P), Fig. 1]가 顯微鏡으로 측정되었다. 4개의 파라미터의 組合과 그 組合의 경우에 해당하는 熔融部의 크기 사이에는 一對一 對應關係(one to one unique correlation)가 성립함을 알 수 있었고 $S(t)$ 의 파형에 따라 變化率이 심한 d 와

C_2 가 그때의 熔融部의 크기와 같이 Table 2에 收錄되었다. 여기서 각 파라미터들과 그 경우의 熔融部 크기 사이에 성립하는 數學的인 關係式은 심한 非線形性(nonlinearity) 때문에 구할 수 없었으나 본 연구에서 提示한 熔融部 推定方法은 熔接遂行時 測定 가능한 電極分離信號를 體系的으로 分析하여 파형을 支配하는 파라미터를 통하여 가능하기 때문

Table 2 Parameters and nugget size for various welding conditions

Weldment Group No.	Weldment Group	ρ	C2	Nugget size [mm]	
				Diameter	Penetration
1	513	0.937	9.609	5.597	2.763
	523	2.543	8.913	5.304	2.683
	533	4.451	8.424	4.785	2.410
2	512	1.750	9.899	5.759	2.218
	522	2.655	8.798	5.553	2.190
	532	5.544	8.984	5.474	2.053
3	511	2.381	12.314	5.123	1.581
	521	3.592	9.982	4.813	1.469
	531	6.388	9.203	4.737	1.239
4	313	2.376	9.948	3.804	2.216
	323	3.872	8.252	3.065	2.061
	333	5.329	7.608	2.921	1.628
5	312	2.835	9.479	4.057	1.976
	322	4.358	7.599	3.517	1.779
	332	5.305	6.774	3.347	1.563
6	311	3.179	10.383	3.844	1.290
	321	4.402	9.136	3.871	1.161
	331	5.782	7.702	3.773	1.138
7	411	2.011	11.028	4.883	1.535
	421	3.196	9.645	4.708	1.422
	431	5.669	9.275	4.245	1.288



에 經濟性이 있고 충분히 應用可能한 技法이라 생각된다. 즉, 尙大한 實驗을 통하여 廣範圍한 熔接條件에서 電極分離 신호파형을 支配하는 파라메터의 組合를 구하여 컴퓨터에 記憶시키면 熔接된 製品을 破壞檢査를 거치지 않아도 table look-up方式으로 熔融部 推定을 통한 品質管理(quality control)가 가능할 것이다.

5.2 分流效果(Shunt Effect)에 따른 電極分離 신호의 變化測定 實驗結果

Fig. 10에는 1.6mm두께의 鋼板을 熔接할때 分流效果(shunt effect)가 없을 경우와 있을 경우($d_s=10, 20mm$) 구해진 電極分離 신호의 파형이다. 前述한 바와같이 分流效果(shunt effect)는 熔融部로 흐

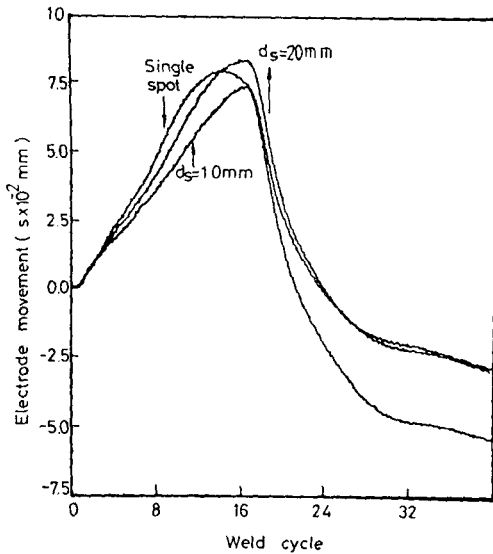


Fig. 10 Effect of shunt spacing upon electrode movement
(Electrode force=350kgf, Weld current=5.3kA)

르는 熔接電流를 감소시켜 충분한 熔融이 일어나지 못하게 함을 알 수 있고 shunt spacing(d_s)이 작을 수록 shunt 回路의 抵抗이 작아지므로 shunt 電流의 크기는 증가하여 電極分離신호의 增加率(rate of rise)이 감소함을 관찰할 수 있다. 分流效果(shunt effect)가 있을 경우($d_s=10, 20\text{mm}$)에는 熔接時間 16사이클이 終了되어도 충분한 熔融이 일어나지 못하여 실험 (1)의 결과에서 論及한 電極의 陷入(embedding)現象이 관찰되지 않는다. 3가지 파형이 얻어진 熔接條件은 모두 同一함에도 불구하고 分流效果(shunt effect)로 惹起되는 熔接質 低下現象을 電極分離신호파형의 差異에서 感知(monitoring)할 수 있다.

5.3 熔接工程 制御세스팀의 性能評價 實驗 結果

Fig. 11에는 良好한 熔接狀態를 나타내어 熱入力 3kW에서 얻어진 원하는 熔接狀態를 의미하는 S_d (desired curve of electrode movement)와 外亂效果를 假定하여 $u_0=2\text{kW}$ 에서 시작한 反復學習制御(iterative self-learning control) 결과 구해진 $S_0, S_1, S_2, S_3 \dots S_{12}$ 의 파형이 각각 圖示되어 있다. S_d 와 S_0 는 熔接狀態의 差異 즉, 電極磨滅 및 分流效

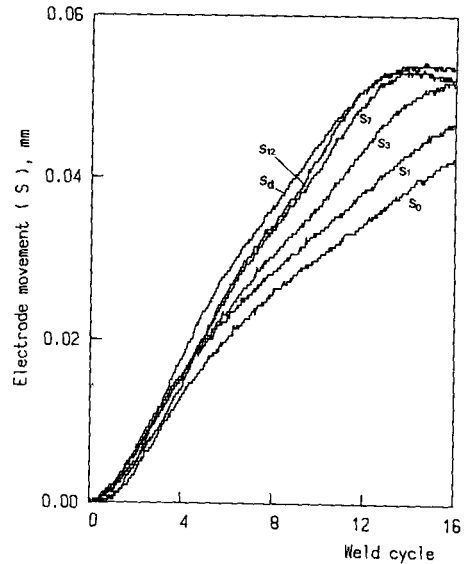


Fig. 11 Learning performance in terms of output response ($\Phi=20, \Gamma=100$)
Electrode force=360kgf
 S_d : desired electrode movement curve,
 S_k : iterative response of electrode movement at the (k)th trial

果(shunt effect)로 충분한 熱入力이 가해지지 못한 결과 S_0 가 구해진 경우와 熱入力이 비교적 충분한 경우의 S_d 를 對照的으로 보여준다. 前述한 學習制御 알고리즘에서 $\Phi=20, \Gamma=100$ 일 경우 反復施行할 때 S_0 에서 S_d 로 점차 接近함을 알 수 있고 12번째 反復施行의 경우 S_{12} 는 비교적 S_d 와 近接했다. 여기에서 S_d 와 S_k 의 오차를 보다 體系的으로 分析하기 위해 다음과 같은 指數(index)를 定義한다: (Normalized Square Error Sum: NSES로 以下에서 表記함)

$$NSES = \frac{\sum_{i=1}^n e_k^2(t_i)}{\sum_{i=1}^n e_0^2(t_i)} \quad (5)$$

여기서 $e_k(t_i) = S_d(t_i) - S_k(t_i)$ 이고 t_i 는 샘플링 시간, n 은 熔接施行할 때 샘플링되는 S 의 갯수이며 $e_0(t_i)$ 는 첫번째 施行에서의 誤差를 의미한다.

Fig. 12에는 反復學習制御에서 比例 利得 Φ 에 따른 NSES의 변화가 施行횟수가 증가할 때 圖示되어 있다. $\Phi=20$ 일 경우와 $\Phi=40$ 일 경우는 初期 誤差의 감소상태가 약간 差異나고 그 以後는 거의 同一하고 $\Phi=80$ 일 경우는 利得이 너무 큰 관계로

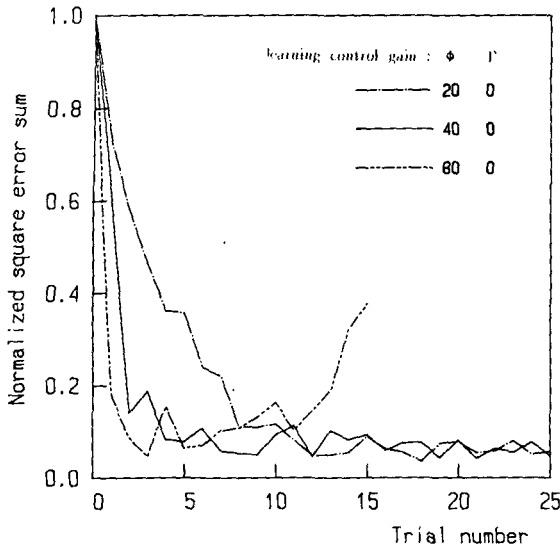


Fig. 12 Effect of proportional gain(Φ) on learning performance

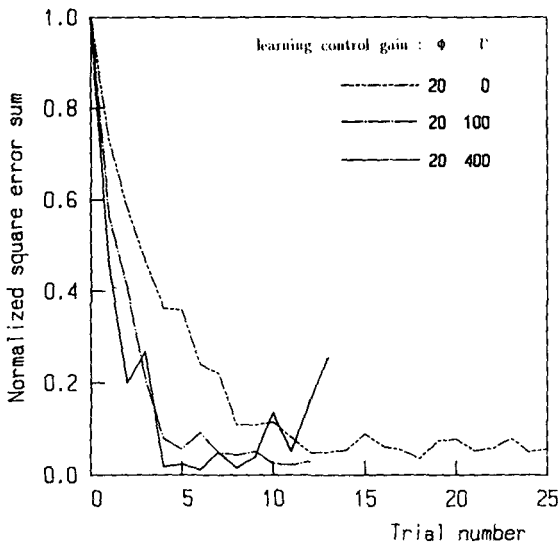


Fig. 13 Effect of derivative gain(Γ) on learning performance

S_k 의 振動(oscillation)과 發散(diverge)하는 狀態를 보여주고 있고 이러한 現象은 $S_k(t)$ 의 그래프를 통해서도 確認되었다.

Fig. 13에서는 反復學習制御에서 微分 利得 Γ 의 변화에 따른 NSES의 감소상태가 圖示되어 있다. 比例 利得 $\Phi=20$ 인 경우 $\Gamma=0$ 에서 $\Gamma=100$ 으로

변하면 NSES가 감소하는 경향이 施行횟수 k 에 대해 상당히 빨라짐을 보여준다. 微分 利得 Γ 가 400으로 커질 경우 역시 S_k 의 振動과 發散이 일어난을 알 수 있다.

이상의 결과에서 NSES의 값이 감소함에 따라 S_k 가 S_d 에 接近함을 알 수 있었고 學習制御의 利得 Φ, Γ 의 값에 따라 NSES 減少傾向이 달라지는 現象은 일반적인 피드백 制御 시스템과 類似하다는 사실도 확인할 수 있었다. 한편 抵抗 點熔接工程의 變數인 S_k 가 S_d 에 接近함에 따라 外亂效果가 補償(compensation)되는 本 實驗結果를 실제 熔接質(熔融部の 크기)을 통해 확인하기 위해 前述한 熔接試片의 組織檢査를 遂行하였다. 熔融部の 中央을 切斷하여 mounting, polishing 및 etching 過程을 거치면 Fig. 14와 같은 橢圓形狀의 熔融部가 관찰된다. 熔融이 일어났던 덴드라이트(dendrite) 組織周圍에 熱影響部(HAZ)가 보인다. 덴드라이트(dendrite) 組織의 크기가 熔融部(nugget)의 크기에 해당된다. 橢圓의 直徑이 熔融部の diameter (D)로 測定되고 두께가 penetration(P)으로 測定된다.

Fig. 15~Fig. 19에는 反復學習制御에서 각 制御利得에 따른 NSES의 減少傾向과 각 施行횟수(trial number)에서 取한 熔接試片의 熔融部 크기가 變化하는 傾向이 도시되어 있다. 그림의 위부분에서 一點鎖線으로 表示된 reference diameter와 reference penetration은 원하는 熔接狀態에서(基準電極分離 신호, S_d 가 샘플링된 熔接條件에서) 取한 熔接試片의 熔融部(nugget)의 크기를 의미한다. 熔接 施行횟수가 증가함에 따라 熔融部の 크기에 약간의 不規則한 變動(small fluctuation)이 나타나 이 現象은 熔接試片을 切斷하는 과정과 polishing하는 과정 그리고 顯微鏡으로 熔融部를 測定하는 과정에서 발생한 誤差때문이라고 推定된다. NSES에 따른 熔融部 크기의 變化傾向은 NSES가 減少할수록 熔融部の 크기는 원하는 熔接狀態에서 求해진 reference diameter와 penetration의 크기에 接近함을 Fig. 15~Fig. 19에서 뚜렷히 確認할 수 있었다. 또한 Fig. 19에서는 制御利得이 너무 클 때 S_k 가 發散함에 따라 NSES도 發散하고 熔融部の 크기도 원하는 값에 接近할 수 없음을 觀察할 수 있다.

이상의 反復學習制御 實驗結果에서 考察할 수 있는 중요한 사실은 本 연구에서 개발한 熔接 制御시

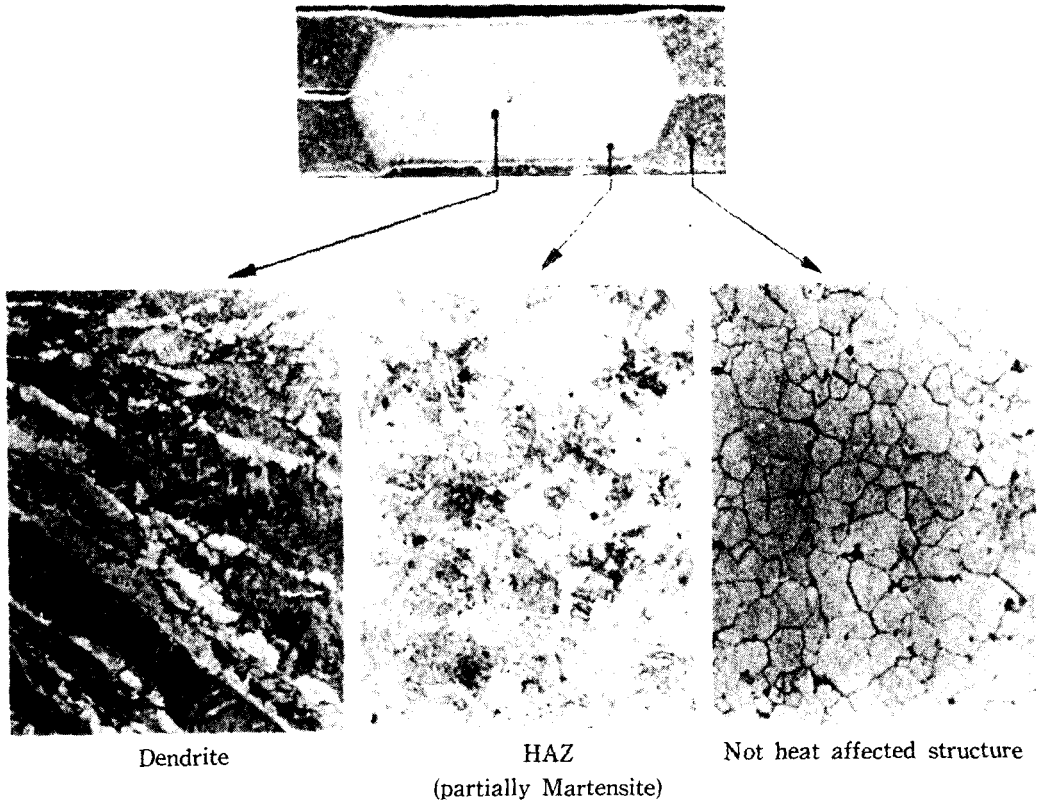


Fig. 14 Metallurgical structure of cross-sectioned spot weld

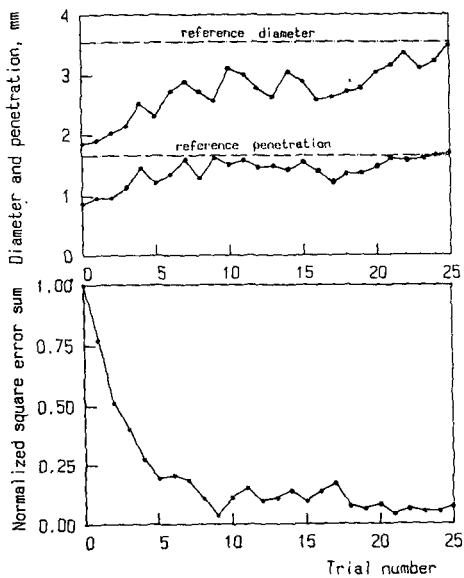


Fig. 15 Learning performance in terms of weld quality ($\phi=10, \Gamma=0$)

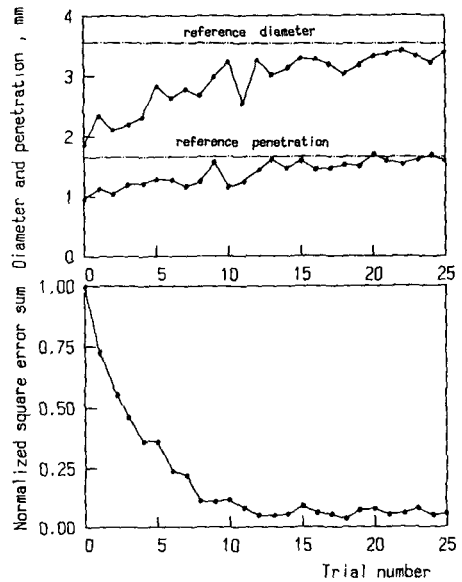


Fig. 16 Learning performance in terms of weld quality ($\phi=20, \Gamma=0$)

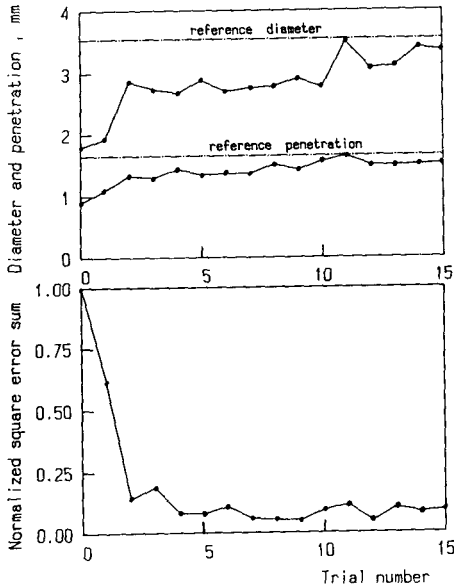


Fig. 17 Learning performance in terms of weld quality ($\phi=40, \Gamma=0$)

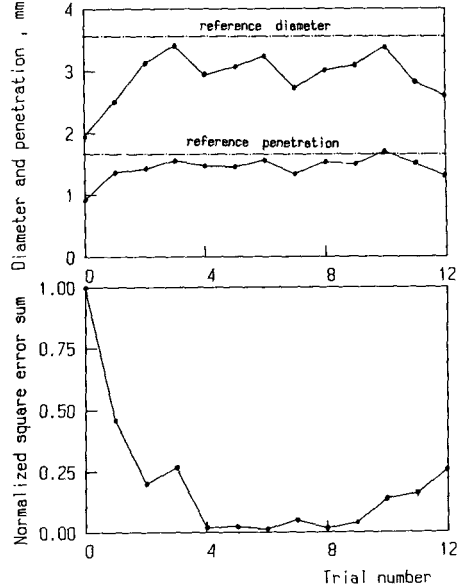


Fig. 19 Learning performance in terms of weld quality ($\phi=20, \Gamma=400$)

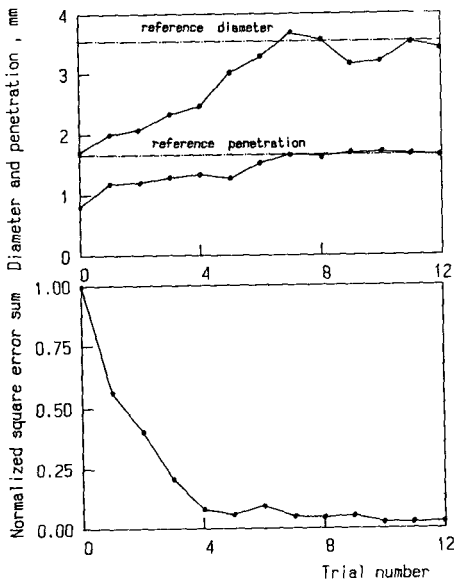


Fig. 18 Learning performance in terms of weld quality ($\phi=20, \Gamma=100$)

스텝에서는 制御利得의 選定이 시스템의 性能에 결정적인 影響을 미치지 않는다는 사실이다. 즉 S_k 가 施行횟수의 增加에 따라 發散하지 않을 範圍以內로만 制御利得이 選定된다면 NSES의 收斂速度

의 側面에서만 差異가 나타날 뿐 最終적으로는 원하는 熔接狀態에 到達함을 알 수 있다. Fig. 15와 Fig. 16에서는 比例利得 ϕ 가 비교적 작을 경우 25회 정도의 反復學習制御 熔接을 施行하면 원하는 熔接狀態에 거의 到達함을 보여주고 있고 Fig. 17에서는 $\phi=40$ 일때 15회의 施行후에 到達하였고 Fig. 18에서는 微分利得 Γ 가 追加되어 12회 정도면 원하는 熔融部의 크기가 얻어진다. 이러한 사실은 抵抗點熔接工程의 制御器 設計에서 가장 큰 難點인 制御利得을 選定(tuning)하기 위한 動的모델(dynamic model)을 設定하기가 거의 不可能한 점을 克服할 수 있다는 意味로 解析될 수 있다. 傳統的인 피드백 制御技法에 의한 여러 연구^(2-4,8)에서는 어떤 特定한 制御利得에서만 滿足할 만한 結果가 얻어지기 때문에 그 制御利得을 구하기 위해 수많은 施行錯誤方式의 豫備實驗이 不可避 했었다.

6. 結 論

抵抗點熔接工程에서 熔接質 向上을 위한 制御裝置를 開發한 本 研究의 結論은 다음과 같다.

(1) 熔融部의 크기는 熔接試片의 破壞·組織檢査를 통해서만 알 수 있었으나 熔接變數中의 하나인 電極分離 신호를 파라미터를 導入한 數學的 모델을

設定하여 分析함으로서 파라메터의 固有한 값의 組合을 통하여 熔融部의 크기를 推定할 수 있었다.

(2) 鎔接質 沮害要因中 分流效果(shunt effect)는 電極分離신호를 分析함으로서 不充分한 熔融部가 形成되는 過程을 確認할 수 있었다.

(3) 電極分離신호를 工程變數로 하고 學習制御(self-learning control) 알고리즘을 採擇한 本 制御 시스템의 性能評價 實驗結果 電極磨減 및 分流效果(shunt effect) 등의 鎔接質 沮害要因인 外亂效果가 충분히 補償(compensation)되어 원하는 鎔接質을 항상 얻을 수 있었다. 또한 制御利得選定을 위한 모델을 구하기 어려운 抵抗 點鎔接工程에 適合한 制御裝置임이 밝혀졌다. 즉, 本 制御시스템은 일반 적인 피드백 制御시스템과 달리 制御利得에 따라 制御性能이 매우 敏感하지 않은 特性을 나타내고 있다.

(4) 本 연구의 制御시스템은 實時間으로 鎔接質을 感知(monitor)할 수 있고 또한 鎔接質 沮害要因이 발생할 때는 自動的으로 反復學習制御(iterative self-learning)動作을 취하여 鎔接質 沮害要因을 除去할 수 있었다.

후 기

本 研究는 1988年度 文敎部 學術研究 造成費에 의하여 이루어 졌으며 關係者 여러분께 感謝의 뜻 을 表합니다.

참 고 문 헌

(1) Gedeon, S.A., Sorensen, C.D., Ulrish, K.T., and Eagar, T.W., 1987, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", *Welding Journal*, Dec., pp. 378~385.
 (2) Wood, R.T., Bauer, L.W., Bedard, J.F., Bernstein, B.M., Czechowski, J., D'Andrea M.M., and Hogle R. A., 1985, "A Closed Loop Control System for Three-Phase Resistance Spot Welding", *Welding*

Journal, Dec., pp. 26~30.
 (3) Cho, H.S., 1986, "An Automatic Quality Controller for Resistance Spot Welding Processes", *Annals of the CIRP*, Vol. 35/1, pp. 355~358.
 (4) Chang, H.S., Cho, Y.J., Choi, S.G. and Cho, H.S., 1989, "A Proportional-Integral Controller for Resistance Spot Welding Using Nugget Expansion", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 111, No. 2, pp. 332~336.
 (5) Gould, J.E., 1987, "An Examination of Nugget Development During Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Technique", *Welding Journal*, January, pp. 1s~10s.
 (6) Owusu-Ofori, S.P. and Wu, S.M., 1983, "Signature Analysis of Contact Voltage of Resistance Welds", *Welding Journal*, July, pp. 185s~189s.
 (7) Waller, D.N. and Knowlson, P.M., 1965, "Electrode Separation Applied to Quality Control in Resistance Welding", *Welding Journal*, April, pp. 168s~174s.
 (8) Kuchar, N.R., Cohen, R.K., Nied, H.A. and Godwin, S.J., 1982, "A Closed-Loop Control System for Resistance Spot Welding", *Measurement and Control for Batch Manufacturing*, D.E.Hardt, ed. Book No. H00244., The American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 89~103.
 (9) The Welding Institute, 1977, "Resistance Welding Control and Monitoring", Cambridge.
 (10) Chang, H.S. and Cho, H.S., 1987, "Estimation and Control of the Weld Nugget Size in Resistance Spot Welding Processes", *Sensors for Manufacturing*, PED-Vol.26, American Society of Mechanical Engineers, Book No. G00405, New York, pp. 215~227.
 (11) 장희석, 조형석, 1988, "저항 점 용접공정의 최적 제어", '88 한국 자동제어 학술회의 논문집, 서울, pp. 370~373.
 (12) Arimoto, S., Kawamura, S., and Miyazaki, F., 1985, "Can Mechanical Robots Learn by Themselves", 2nd ISRR, MIT press, Cambridge, pp. 127~134.