

**研究論文**

## 점용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 최적 용접 조건 선정에 관한 연구

서승일\* · 이재근\*\* · 장상길\*\* · 차병우\*\*

### A Study on the Optimum Welding Conditions for Reducing the Depth of Indentation of Surface in Spot Welding

S. I. Seo\*, J. K. Lee\*\*, S. K. Jang\*\* and B. W. Cha\*\*

**Keywords** : Spot welding (점용접), Indentation (압흔), Optimum welding condition (최적 용접조건), Simplified one-dimensional bar model (간이 1차원 봉모델), Tensile strength (인장강도), stainless rolling stocks (스텐레스 철판차량)

#### Abstract

In this paper, authors are trying to find optimum spot welding conditions to minimize indentation of the plate surface which is crucial to quality of stainless rolling stocks. At first, to derive a simple equation to estimate the depth of indentation, a simplified one-dimensional bar model is proposed and validity of the model is confirmed by experiments. And also, to find proper welding conditions giving satisfied tensile strength of the welded joint, a simple formula is derived referring to the standard spot welding conditions by AWS. Optimization problem is formulated to find welding conditions such as welding current, time and applied force which give minimum indentation and proper tensile strength of joint, and solutions are found out. According to the results, the depth of indentation can be expressed by applied electrode forces and it can be shown that an optimum applied force exists.

---

\* 정회원, 한진중공업 산업기술연구소

\*\* 비회원, 한진중공업 산업기술연구소

## 1. 서 론

점용접 (spot welding)은 전극팁의 가압력과 통전 전류에 의한 저항 발열에 의해 판과 판의 접촉면에서 용융 너겟이 형성됨으로 접합이 이루어지게 하는 용접 방법으로 자동차, 철도 차량 등의 조립에 광범위하게 적용되고 있다. 용접부의 일차적인 목적은 적절한 접합 강도를 유지하는 것인데, 특히 점용접의 경우는 접합 강도의 척도가 되는 너겟부를 비파괴 육안 검사로 검증하는 일이 불가능하기 때문에, 강도가 요구되는 구조 부재의 접합 시에는 적정 강도 확보를 위한 용접 조건의 선정이 중요한 관심사가 된다<sup>1)</sup>. 그런데, 점용접부에서는 저항 발열에 의한 고온 영역이 형성되고, 전극팁의 가압력은 고온에서 변형 저항 능력이 저하된 모재에 소성 변형을 유발시켜 압흔 (indentation)을 형성시키게 된다.

최근에 스텐레스 철도 차량이 개발되어 객차와 전동차용으로 활용되고 있는데, 스텐레스 철도 차량은 표면의 광택을 살리기 위해 도장 작업을 생략하고 있으며, 이 경우 외판의 요철은 미려도를 저하시키므로 차량의 품질 저하의 최대 요인이 된다. 따라서 적정 인장강도 확보와, 압흔깊이의 감소가 스텐레스 철도 차량의 점용접 시 추구해야 할 최대 과제라 할 수 있다. 이 과제를 해결하기 위해서는 먼저 점용접 조건이 강도와 압흔 깊이에 미치는 영향을 정확히 파악할 필요성이 있게 된다. 이 등<sup>2)</sup>에 의해 점용접 시의 인장강도와 용접 조건과의 관계에 대한 수치해석 및 실험에 의한 연구가 수행된 바 있으나, 압흔깊이와의 관계성은 생략하였다. 본 연구에서는 적정 인장강도 확보와 압흔깊이 감소를 위한 최적 점용접 조건을 도출하는 것을 목표로, 점용접부 용융 과정과 소성 변형 생성 과정을 기술할 수 있는 간략한 모델을 제시하고, 이로부터 압흔깊이와 용접 조건의 상관식을 도출하고, 도출식의 타당성을 실험을 통해 검증한다. 또한 용접 접합부의 인장강도 확보를 위한 적정 용접조건 계산식을 열전도 이론과 표준용접조건으로부터 도출하고, 이를 바탕으로 최적화 문제를 구성하여 인장강도를 만족시키면서, 압흔깊이를 감소시키는 최적 용접조건을 찾아낸다.

## 2. 압흔깊이 추정을 위한 간이 모델

점용접 과정에서 발열 시 온도 상승에 의한 연화와 가압에 의한 응력이 소성 변형을 유발함으로써, 압흔이 최종적으로 잔류한다고 볼 수 있다. 압흔깊이와 용접조건과의 관계를 규명하기 위해 용접조건의 변경에 따른 압흔깊이 측정 실험을 반복 수행하고 결과를 정리함으로써, 관계식을 도출해 내는 방법을 택할 수 있으나, 이 방법은 압흔깊이와 관련한 용접변수를 전극 가압력, 전극팁의 직경, 용접전류, 통전시간, 재료의 항복응력, 탄성계수 등으로 선정할 때, 용접변수의 조합에 따른 실험의 횟수가 기하학적으로 증가된다는 단점이 있다. 최근에 발달된 유한요소법에 의한 범용 구조 해석 소프트웨어들<sup>3)</sup>은 열전도에 따른 탄소성 해석을 수행할 수 있는 기능이 있으므로, 점용접 시의 압흔 형성 과정을 컴퓨터로 시뮬레이션하는 일이 가능하다. 그러나, 소성영역의 비선형 해석을 위해 소요되는 막대한 컴퓨터 계산 시간과 용접조건의 조합에 따른 수많은 계산 횟수로 말미암아, 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 압흔깊이와 관련한 용접 인자 도출을 위한 과정에 적용하기는 곤란한 실정이다. 본 연구에서는 압흔깊이의 분석을 실험 또는 컴퓨터 시뮬레이션에 의존하는 경우의 문제점을 극복하기 위해서, 이론과 실험을 조합하는 방법을 선택하고자 한다. 즉, 간략한 이론적 모델에 의해 압흔 형성 과정을 이상화하고, 압흔 형성에 지배적인 인자를 찾아낸 다음 실험을 통해 이상

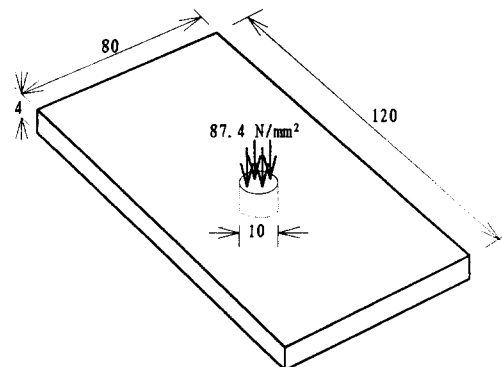


Fig. 1 Idealized figure of spot welding process

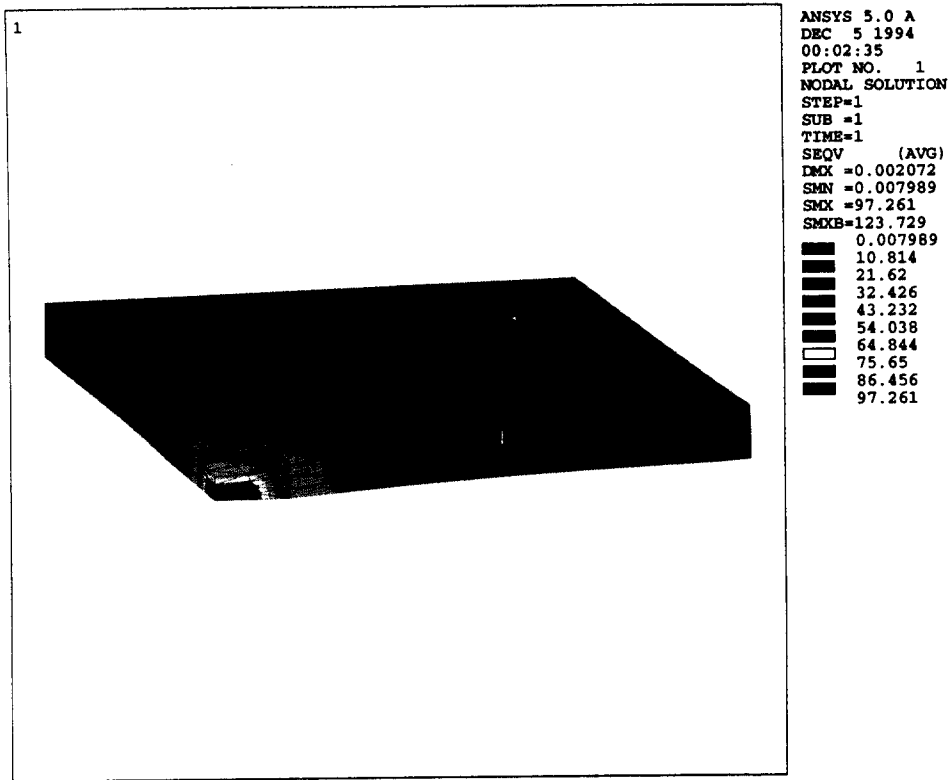


Fig. 2 Calculated results for plate with applied force

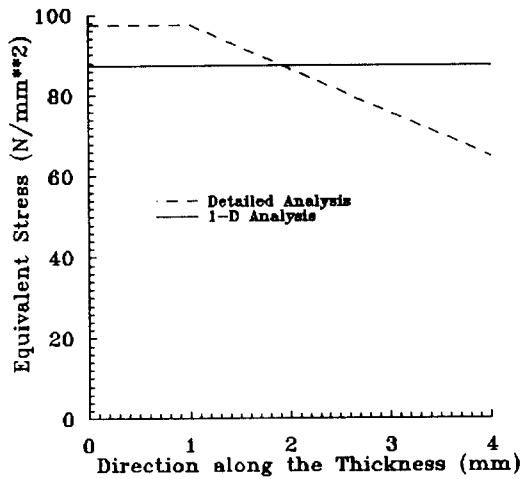


Fig. 3 Comparison of stress between detailed analysis and simplified analysis

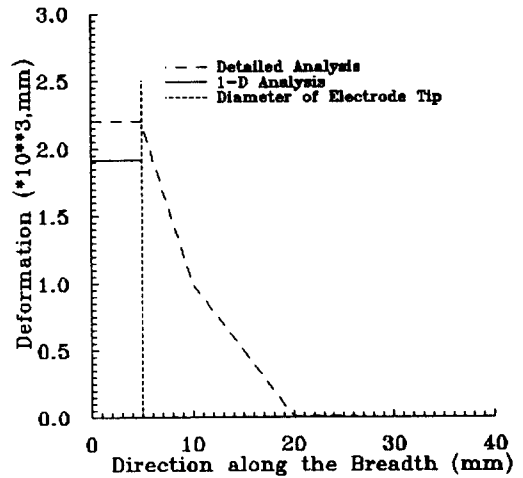


Fig. 4 Comparison of deformation between detailed analysis and simplified analysis

화 모델의 유용성을 입증한 후, 압흔깊이와 인자와의 상관 관계를 추정하고자 한다.

압흔은 가압력에 의해 유발된 판내부의 응력과 고온에서 항복응력의 저하에 의한 소성변형의 증가에 의해 발생한다고 볼 수 있다. 판을 접합하는 점용접 과정을 개략적으로 Fig. 1과 같이 원형의 전극팁을 통해 판에 균일 가압력이 가해지는 경우로 이상화할 때, 판내부에 유발된 응력을 상세 유한요소 해석을 통해 구해 보면 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 3차원 Solid Element<sup>3)</sup>를 이용하여 1/4 모델에 대해 탄성해석을 수행하였을 때, 상당응력 (equivalent stress) 분포와 변형 양상을 보여주는 그림이다. Fig. 2을 좀더 정확히 그려보면 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. Fig. 3에 따르면 판 내부에 발생하는 상당응력은 전극팁 직하부 판을 원통의 붕으로 간주하고 계산한 응력치와 근접한 결과를 보여주고 있다. Fig. 4는 상세 해석에 의한 변위 계산 결과가 1차원 원통붕에 대해 Poisson 효과 만큼을 고려한 변위 계산 결과와 상당히 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이 사실에 기초하여 해석의 단순화를 위해 점용접부의 응력 분포 및 역학적 거동을 1차원 붕 (bar)의 응력 상태 및 역학적 거동과 일치한다고 가정할 수 있다. 금속 재료는 변형에 저항하는 능력이 저하되므로 항복응력, 탄성계수 등과 같은 재료 특성 변화를 소성 변형 형성 과정에 포함시켜야 한다. 점용접 시, 판두께 방향의 온도 변화가 발생하는데, 각 위치별로 서로 다른 온도를 모두 고려하여 소성 변형을 구하기 위해서는 상세 해석이 필요하나, 본 연구에서는 간략화를 위해 판두께 방향 온도 분포의 평균치를 택하여 균일 온도로 가정하고, 소성 변형을 구한다. 이와 같은 가정에 따라 1차원 붕의 소성변형도를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{(1-H)}{HE} (\sigma - \sigma_y) = \epsilon_p = \frac{\delta}{h} \quad (1)$$

여기서, H = 변형경화 계수  
(strain hardening coefficient)  
E = 영률 (Young's modulus)  
 $\sigma$  = 압축 응력  
 $\sigma_y$  = 항복응력  
 $\epsilon_p$  = 소성변형도

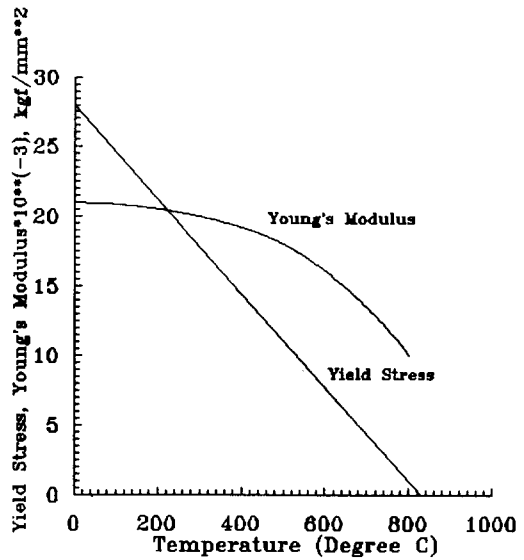


Fig. 5 Variation of mechanical properties of steel according to temperature

$\delta$  = 소성변형

h = 판두께

온도 변화에 따른 강 (steel)의 재료 특성의 변화는 Fig. 5<sup>4)</sup>와 같은데, 고온 영역에서 항복응력의 감소가 탄성계수의 감소보다 현저하고, 탄성계수는 일정 온도까지 변화량이 적으므로, 간략화를 위해 탄성계수는 온도 변화에 따라 일정하고 항복응력은 선형적으로 변화한다고 가정할 수 있다. 재료의 온도 의존성을 고려한 소성변형 계산식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{(1-H)}{HE} (\sigma - \sigma_{y0} + b_1 T) = \frac{\delta}{h} \quad (2)$$

여기서, T = 평균온도  
 $b_1$  = 항복응력의 온도에 따른 감소 계수  
 $\sigma_{y0}$  = 상온에서의 항복응력

평균온도는 발생 열량을 기초로 하여 구할 수 있는데, 점용접 시에 발생하는 열량은

$$Q = I^2 R t \quad (3)$$

여기서,  $Q$  = 열량  
 $I$  = 전류  
 $R$  = 저항  
 $t$  = 시간

으로 표현된다. 점용접 시 발열의 주요 원인인 접촉저항(contact resistance)은 가압력의 지수승에 비례한다는 것이 알려져 있는데, 접촉저항 측정 결과<sup>1)</sup>를 토대로 하여 다음식으로 표현할 수 있다.

$$R = k \frac{1}{F} \quad (4)$$

여기서,  $F$  = 가압력  
 $k$  = 비례 계수

(3), (4) 식을 (2) 식에 대입하면 소성변형 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{(1-H)}{HE} \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} + b_1 \frac{4I^2 t}{\pi c \rho d^2 h F} \right) = \frac{\delta}{h} \quad (5)$$

여기서,  $d$  = 전극팁 접촉면의 직경  
 $c$  = 비열  
 $\rho$  = 밀도

(5) 식을 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$e_1 \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} \right) + e_2 \frac{I^2 t}{d^2 h F} = \frac{\delta}{h} \quad (6)$$

여기서,  $h$  = 접합하는 판의 총두께  
 $e_1, e_2$  = 재료에 따라 결정되는 상수

Fig. 6와 같은 시편에 대해 Fig. 7의 전극팁으로 점용접을 실시하고, 각 용접 조건에 대해 압흔깊이

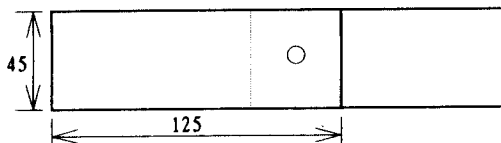


Fig. 6 Test specimen

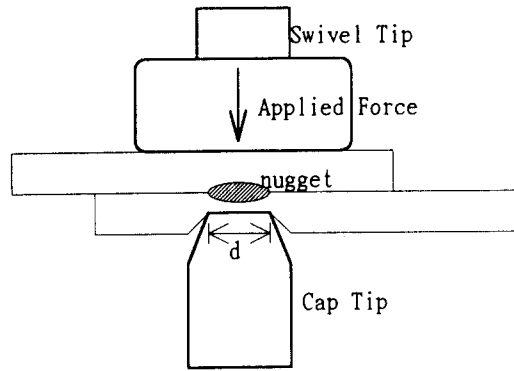


Fig. 7 Sketch of spot welding process

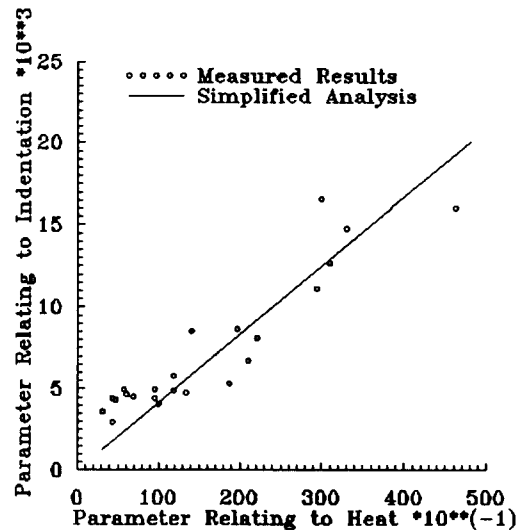


Fig. 8 Arranged results of measured depth of indentation according to proposed parameters

를 예측한 결과를 (6) 식의 변수로 정리한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 x축은 용접 입열량에 관련한 변수로써 (6) 식의  $\frac{I^2 t}{hd^2 F}$ 에 해당하고, y축은 변형량에 관련한 변수로써 (6) 식의  $\frac{\delta}{h} - e_1 \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} \right)$ 에 해당한다. Fig. 8의 실선은 다음식을 그림으로 나타낸 것이다.

$$2 \times 10^{-3} \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} \right) + 4.17 \times 10^{-6} \frac{I^2 t}{d^2 h F} = \frac{\delta}{h} \quad (7)$$

여기서,  $F$  = 가압력 (kgf)

$d$  = 전극팁 접촉면 직경 (mm)

$\sigma_{y0}$  = 상온에서의 항복응력 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$I$  = 용접 전류 (A)

$t$  = 통전 시간 (cycle)

$h$  = 용접되는 판의 총두께 (mm)

$\delta$  = 압흔 깊이 (mm)

Fig. 8에 따르면 압흔 깊이를 계산하기 위해 유도한 (6)식이 실험 결과를 적절히 표현할 수 있는 식임을 알 수 있고, 실험을 통해 (7)식의 정확성을 입증할 수 있다. (7)식에서 첫째항은 가압력에 의해 발생하는 기계적인 변형량을 나타낸다고 볼 수 있고, 둘째항은 전류의 흐름에 의해 발생하는 열에 의해 유발된 잔류열변형량을 나타낸다고 볼 수 있다.

### 3. 점용접부의 인장강도 확보를 위한 용접 조건

점용접에 의한 이음부가 적절한 전단인장강도를 갖기 위해서는 접촉면에서 충분한 용융이 이루어져야 한다. 충분한 용융은 접촉면에서의 발열에 의한 온도가 금속의 용융온도 이상이 되어야 함을 의미한다.

너겟이 형성되는 판접촉부의 전류통로  $d_e$ 는

$$d_e = d + 0.8h_1 \quad (8)$$

여기서,  $h_1$  = 접합하는 판의 한쪽 판의 두께

로 주어지고, 전류밀도  $i$ 는

$$i = \frac{I}{\pi d_e^2} = \frac{I}{\pi (d + 0.8h_1)^2} \quad (9)$$

가 된다. 발열이 모두 온도 상승으로 되는 경우, 저항의 온도의존성을 고려하면 다음의 식이 성립한다.

$$c\rho \frac{T}{t} = (\beta T + 1)q \quad (10)$$

여기서,  $T$  = 온도

$\beta$  = 저항의 온도의존성을 나타내는 계수

$q = T$ 가 0 일 때 단위 시간, 단위 체적당의 발열량

(10)식의 해를 얻은 후 초기 조건,  $t=0$ 에서  $T=0$ 을 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$t = \frac{c\rho}{\beta q} \ln(\beta T + 1) \quad (11)$$

연강에 대한 Table 1의 자료를 대입하면 다음의 식이 얻어진다<sup>1)</sup>.

Table 1. Physical properties of mild steel

Item of physical properties	Numerical value
비열	0.16 cal/g °C
비저항 (specific heat)	$0.15 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$
저항의 온도의존성 계수	$6.7 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
밀도	$7.6 \text{ g/cm}^3$
용융온도	1500°C

$$t = \frac{7.284 \times 10^5}{i^2} \quad (12)$$

(12)식은 이론식으로써 가압력에 대한 영향이 고려되어 있지 않으므로 표준 용접 조건을 수식적으로 표현하는데 불합리하다. 가압력의 영향을 고려함으로써, 표준 용접 조건을 수식화하기 위해 (12)식을 다음과 같이 변경한다.

$$\frac{t^{0.18}}{F^{0.18}} = 1.05 \times 10^5 (d + 0.8h_1)^4 \quad (13)$$

AWS (American Welding Society)<sup>5, 6)</sup>에서 제시한 표준 용접 조건을 (13)식에서 제시한 변수로 정리해 보면 Fig. 9과 같다. Fig. 9을 통해 표준 용접 조건은 근사적으로 (13)식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

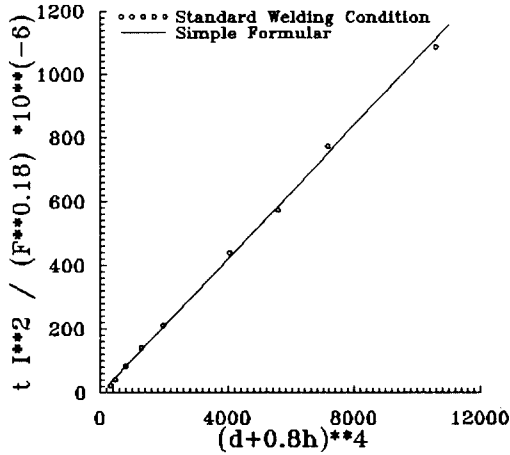


Fig. 9 Curve for fitting standard welding conditions

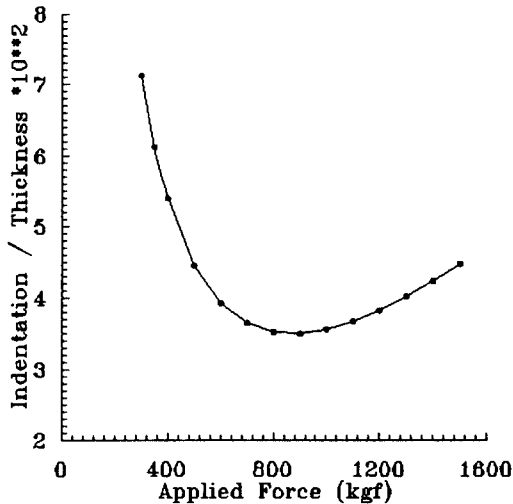


Fig. 10 Variation of indentation according to applied forces

#### 4. 최적 용접 조건의 선정

압흔깊이의 증가는 외관 미려도를 해치므로, 가능한 한 최소화하는 것이 필요하다. 그러나 적절한 인장강도의 확보도 구조물의 안정상 중요한 사항이다. 최적 용접 조건은 이와 같은 사항을 고려하여 정해져야 한다. 이것을 최적화 문제로 치환

해 보면 다음과 같다.

용접변수 : 용접전류  $I$ , 통전시간  $t$ , 가압력  $F$   
 목적함수 : 압흔깊이

$$\frac{\delta}{h} = 2 \times 10^{-3} \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} \right) + 4.17 \times 10^{-6} \frac{I^2 t}{d^2 h F} \quad (7)$$

제한조건 : 인장강도

$$\frac{I^2 t}{F^{0.18} (d + 0.8h_1)^4} = 1.05 \times 10^5 \quad (13)$$

(13) 식을 (7) 식에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$\frac{\delta}{h} = 2 \times 10^{-3} \left( \frac{4F}{\pi d^2} - \sigma_{y0} \right) + 0.438 \frac{(d + 0.8h_1)^4}{d^2 h F^{0.82}} \quad (14)$$

(14) 식을 그림으로 나타내 보면 Fig. 10와 같다. Fig. 10에 따르면 적정 인장강도를 만족시키는 용접조건의 경우에는 압흔깊이가 가압력에 의해 표현됨을 알 수 있다. 가압력이 증가하면 접촉저항의 감소에 따라 발열량이 감소하고 이에 따라 잔류하는 열변형량은 감소됨으로 전체 압흔깊이는 감소됨을 알 수 있다. 그러나 가압력이 과도하게 되면 가압력에 의한 기계적인 소성변형 성분이 증가하게 되므로 압흔깊이는 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서 가압력에 따라 압흔깊이가 최소가 되는 최적점이 존재하고 있음을 알 수 있다. 최적의 가압력이 결정되면 전류 및 통전 시간은 (13) 식에 의해 결정할 수 있게 된다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 점용접 시의 외관 미려도와 직접 관계가 있는 압흔깊이의 감소를 위해, 최적 용접 조건을 찾고자 하였다. 1차원 봉 모델에 기초하여 압흔깊이 추정을 위한 간략식을 제시하고, 실험을 통해 정확성을 입증하였으며, 인장강도 확보를 위한 용접조건의 제한식을 유도하고 표준용접조건과 비교하여 타당성을 입증하였다. 압흔깊이를 목적함수로 하고, 인장강도 확보를 제한조건으로 하여 최적화 문제를 정식화 하면, 적정 인장강도를 만족시키는 용접조건의 경우에는 압흔깊이가 가압력

의 향으로 표현될 수 있음을 알 수 있고, 압흔깊이가 최소가 되는 적정 가압력이 존재하고 있음을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Nakane, K. and Torii, Y.: "Study on Determination of Optimum Welding Condition in Resistance Spot Welding", Journal of Japanese Welding Society, Vol. 42, No. 3, (1973) (in Japanese).
2. 이재갑, 강춘식 : "자동차용 판재의 점용접 시 용접거동 Simulation", 대한용접학회지, 제 12권, 제2호, (1994).
3. "ANSYS User s Manual for revision 5.0", Swanson Analysis Systems Inc., (1992).
4. Focke, A. E. : "Elevated Temperature Properties of Constructional Steels", Metal Handbook, (1985).
5. 中村孝, 小林徳夫, 森本一 : "現代溶接技術大系 抵抗溶接", 産報出版, (1980).
6. "Resistance Welding Manual 2nd Edition", American Welding Society, (1950).
7. "Welding Handbook Volume 2", American Welding Society, (1991).