

<論 文>

點熔接의 너깃지름과 板間接觸지름의 關聯性†

宋 森 弘* · 金 富 東**

(1983年 5月 9日 接受)

A Study on the Correlation between Nugget Diameter and Contact Diameter of Sheets by Electrode Force

Sam Hong Song and Boo Dong Kim

Abstract

It is required in designing a spot welding to get in advance an estimated figure of nugget diameter. A method of estimating nugget diameter of low carbon steel sheets is suggested in terms of utilizing elastic calculation in theory and of making a sectional observation of specimen of spot welding in experiment.

The resultant findings are summarized as follows:

- 1) A contact diameter of sheet, $2r_0$, obtained from an elastic calculation can be expressed in an useful and simple equation: $2r_0 = d_e + (1.1)t$, where d_e is the electrode tip diameter and t is the thickness of sheets.
- 2) The practical measurement of the nugget diameter reveals that $d_n = (1.05)d_e + (0.8)t$, and d_n is less by 0.8~4.3% than $2r_0$.
- 3) The more d_n is as compared with t , the less the difference between a theoretical value and an experimental value is.
- 4) In the spot welding of thin steel sheets less than 3mm in thickness that are commonly used in sheet metal works, the contact diameter equals the nugget diameter. In this case, either the theoretical or experimental approach can be used for estimating the nugget diameter.

1. 序 論

點熔接過程中에서 板이 電極의 加壓力을 받았을 때, (Fig.1) 彈性的인 問題로 因해 板間에 이른 바 sheet

separation이 생기게 된다. 이때문에 上下의 두 板은 압힘應力을 받아 서로 바깥쪽을 향해 굽게 되므로 접침面에는 壓縮應力 外에 引張應力을 받는 部分이 생기게 된다⁽¹⁾. 이때 壓縮應力만을 받는 領域을 板間接觸部라 할 수 있겠고, 이러한 板間接觸部에서 間이 腹間의 通電 發熱하여 熔着되는 것이 點熔接機構의 原理라고 말할 수 있겠다⁽²⁾.

너깃(nugget) 지름(d_n)은 點熔接強度^(3,4)를 決定하는 가장 重要한 要素이다. 그러므로 너깃지름은 熔接

† 1980年度 大韓機械學會春季學術大會(80.7)에서 發表

* 正會員, 高麗大學校 工科學

** 正會員, 京畿工業開放大學

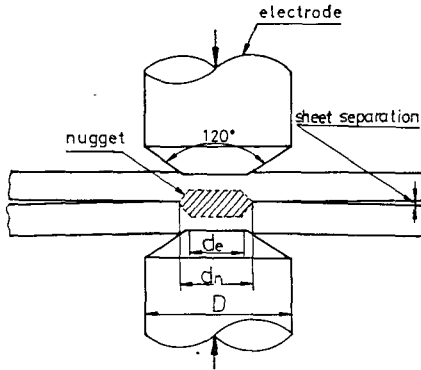


Fig. 1 Features of spot weld mechanism (d_e ; electrode tip diameter, d_n ; nugget diameter)

設計時에 있어서 事前에 반드시 豫測되어야 할 必要性이 있다. 그러나 여태까지 너깃지름을 豫測할 만한 明確한 方法이 提示되어 있지않아, 實際로는 點熔接된 部品를 絶斷하지 않고서는 너깃지름을 알 方途가 없었다.

이러한 問題에 當面하여 本 研究에서는 “板間接觸지름과 너깃지름과의 關聯性”에 對해 檢討하여 보고, 點熔接設計時에 設計因子로서 必要로 하는 너깃지름의 간단한 計算法을 提示하였다. 實驗에 使用한 材料는 自動車工業 및 鐵道車輛製作 等に 널리 쓰이는 冷延鋼板 SCP 1을 택하였다.

2. 彈性計算

Fig. 2에서 板두께 t , 등근板材의 板지름을 $2R$, 電極반지름을 a , 그리고 電極의 加壓力에 依한 分布壓力를 q 로하면, 이러한 境界條件, 問題는 無限板의 境遇로 했을 때 Hankel 變換에 依해 解가 이미 求해져 있다⁽⁵⁾. 이것을 參考로 해서, 여기서는 有限板으로 바꾸어 생각하여 板間接觸應力 σ_z 의 計算式을 얻고져 한다. σ_z 의 計算에 있어서는 加壓力 p_e 의 크기를 一 考慮한것이며 計算에 앞서 다음 的 假定을 設定한다.

- 1) 點熔接되는 2枚 板의 板두께는 서로 同一하다.
- 2) 板은 完全彈性體이다.
- 3) 電極에 依한 加壓力이 板表面에 均一하게 分布되어 있어서, 板의 內部에서는 剪斷應力이 作用하지 않는다.

2.1. σ_z 의 決定

軸對稱形 彈性體에 對해서 應力函數를 ϕ , 電極 中心線에서 直角方向의 距離를 r 이라하면 彈性理論으로부

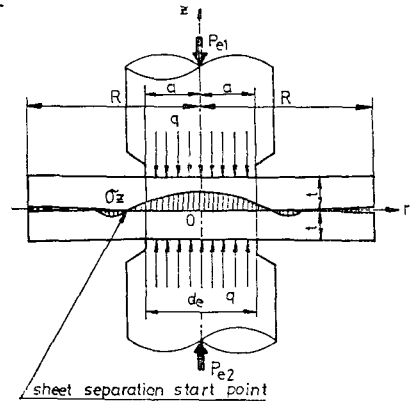


Fig. 2 Electrode force & contact stress distribution
 $P_{e1,2}$; electrode force in upper & lower tip
 d_e ; electrode tip diameter, ($d_e=2a$)
 a ; electrode radius
 q ; distributed electrode force
 t ; thickness of sheets
 σ_z ; contact stress
 r ; arbitrary distance in radial direction of sheets
 R ; radius of specimen

Fig. 2 Electrode force & contact stress distribution

터 다음과 같이 들 수 있다.

$$\nabla^4 \phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

여기서 $\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2$ 이며, Fig. 2의 z 方向 應力 即 板間接觸應力 σ_z 는,

$$\sigma_z = -\frac{\partial}{\partial z} \left[(2-\nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

但 Laplacian 記號 ∇^2 은, $\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 을 뜻하며 ν 는 Poisson의 比이다.

윗 式은 境界條件을 滿足하는 것으로 보고서 Filon의 解法⁽⁶⁾에 依해, 윗 式의 應力函數를 아래와 같이 假定한다.

$$\phi_1 = f_1(z) J_0(kr) \quad (3)$$

여기서 J_0 는 0次의 Bessel 函數이며 k 는 常數이다. 式 (3)을 式 (1)에 代入하면,

$$f_1''(z) - k^2 f_1(z) = 0$$

이것에 依해서

$$f_1(z) = A' e^{kz} + B' e^{-kz} \quad (4)$$

가 얻어진다. 여기서 A', B' 는 常數이다. 式 (4)을 式 (3)에 代入하면 다음과 같이 되고, 이 式은 式 (1)을 滿足한다.

$$\phi_1 = (A' e^{kz} + B' e^{-kz}) J_0(kr) \quad (5)$$

또한 式 (1)은 調和 方程式 이므로,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = (A'e^{kz} + B'e^{-kz})J_0(kr) \quad (6)$$

을 滿足하며, 式(6)는 式(1)의 解가 된다. 이것을 풀면,

$$\phi_2 = \left\{ \frac{1}{2k} (A'e^{kz} - B'e^{-kz})z - (A'e^{kz} + B'e^{-kz}) \right\} \times J_0(kr) \quad (7)$$

따라서 一般解는 다음과 같이 된다.

$$\phi = \left\{ \frac{1}{2k} [A \cosh(kz) + B \sinh(kz)]z + C \sinh(kz) + D \cosh(kz) \right\} J_0(kr) \quad (8)$$

여기서 $A = A' - B'$, $B = A' + B'$, $C = \left(1 - \frac{1}{2k}\right)$

$(A' - B')$, $D = \left(1 - \frac{1}{2k}\right)(A' - B')$ 이다.

境界條件을 $z = +t$ 로 하면 即上板인 때에 $\sigma_z = -Pe_1$, $J_0(kr)$ 가 되고, $z = -t$ 即 下板인 境遇에는 $\sigma_z = -Pe_2$, $J_0(kr)$ 로 되므로 常數 $A B C D$ 를 求하면,

$$\left. \begin{aligned} A &= -(Pe_1 + Pe_2) \cdot \frac{2 \sinh(kt)}{k \sinh(2kt) + 2k^2t} \\ B &= -(Pe_1 + Pe_2) \cdot \frac{2 \cosh(kt)}{k \sinh(2kt) - 2k^2t} \\ C &= (Pe_1 + Pe_2) \cdot \frac{2\nu \sinh(kt) + k \cosh(kt)}{k^3 \sinh(2kt) + 2k^4t} \\ D &= (Pe_1 - Pe_2) \cdot \frac{2\nu \cosh(kt) + kt \sinh(kt)}{k^3 \sinh(2kt) - 2k^4t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

點熔接作業時에는 荷重形態와 크기가 上下 서로 對稱 이니 $Pe_1 = Pe_2 = Pe$ 가 되고, $z=0$ 의 位置에서 板面에 垂直한 板間接觸應力 σ_z 는, 式(2), (8), (9)로부터 다음 式과 같이 얻어진다.

$$\sigma_z = -2Pe \left\{ \frac{(3-2\nu)\sinh(kt) - kt \cosh(kt)}{\sinh(2kt) + 2kt} \right\} J_0(kr) \quad (10)$$

2.2. 計算結果

式(10)을 數值計算한 結果 Fig. 3과 같이 나타났다. 試驗片의 지름方向의 거리 r/R (지름方向의 任意의 거리/試驗片의 지름)가 $0.33 < r/R < 0.46$ 인 區間에서는 σ_z/q (板間接觸應力/加壓力에 依한 分布壓力)값이 a/t (電極 반지름/板 두께)에 따라 (-)符號에서 (+)符號로 바뀌진다. 即 板間接觸應力이 壓縮應力에서 引張應力으로 交替 되어짐을 알 수 있다. 故로 電極 中心線에서 이와같은 交替支點까지의 거리가 板間接觸반지름에 해당되는 것이다. 電極 반지름 a 가($2a = d_e$) 一定할 때 板 두께 t 가 두꺼워질수록 板間接觸 지름이 커지는 것으로 나타났다. $r/R=0.26$ 일 때는 a/t 값에 관계

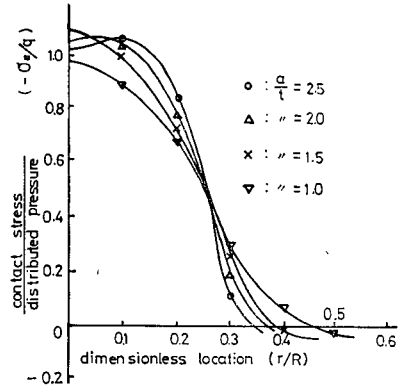


Fig. 3 Contact stress distribution on interface of two steel sheets

없이 σ_z/q 가 一定한 값을 나타내고 있다. 이러한 現象은 Chand等⁽⁷⁾의 研究에서도 찾아볼 수 있는데, 加壓力으로 作用하는 荷重이 集中荷重形態로서 1個이든 2個이든, 혹은 均一 分布荷重이 作用하더라도 關係없이 接觸應力이 零의 값으로 되는 어느 特定한 位置가 存在한다는 事實과 一致性을 보이고 있다.

3. 實 驗

3.1. 試驗片 및 點熔接條件

實驗에 使用한 材料는 冷間壓延된 軟鋼板 SCP 1로써 材料의 機械的 性質은 Table 1에 表示 하였다. 여기서 σ_i 는 彈性限度, σ_u 는 引張強度, E 는 彈性係數, ϵ

Table 1 Mechanical properties of steel sheets

σ_i	σ_u	E	ϵ	MHv50
(kg/mm ²)			(%)	
19.5	31.8	2.1×10^4	30.6	120

은 延伸率 그리고 MHv는 micro Vickers 硬度를 나타낸다. 試驗片으로 使用한 材料는 板의 두께 t 가 各各 다른 $t=1.0\text{mm}$, $t=1.6\text{mm}$, $t=2.3\text{mm}$ 및 $t=3.2\text{mm}$ 인 4種의 鋼板을 圓板形으로 切取했다. 板 지름 $2R$ 은 너깃지름 d_n 의 生成에 影響을 끼치지 않을 程度의 充分한 크기가 되도록 $2R=100\text{mm}$ 로 잡았다. 材料를 切取할 때는 肉眼으로 識別 할 程度의 녹이슨 部分은 避했으며, 材料表面은 3鹽化 에치렌으로 脫脂하고 5%의 HCl로 酸洗한 後 바로 水洗, 熱風 乾燥했다. 같은 두께의 2枚板을 Fig. 4와 같이 겹쳐서 板의 中央部에 點熔接을 하였다. 이때 點熔接條件은 Table 2와

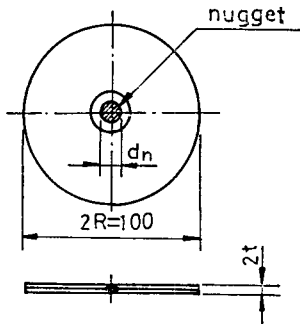



Fig. 4 Shapes and dimensions of specimen by spot welding

같은 推薦值를⁽³⁾ 參考로 했다. 使用熔接機는 國產大明 製作所에서 製作된 點熔接機로써, 熔接機 諸元은 最大

Table 2 Recommended spot welding condition



t (mm)	de/D	Pe (kg)	time (~)	ampere (A)
1.0	5.0/13	225	10	8,800
1.6	6.3/13	360	16	11,500
2.3	7.8/13	580	24	15,000
3.2	9.0/13	820	32	17,400

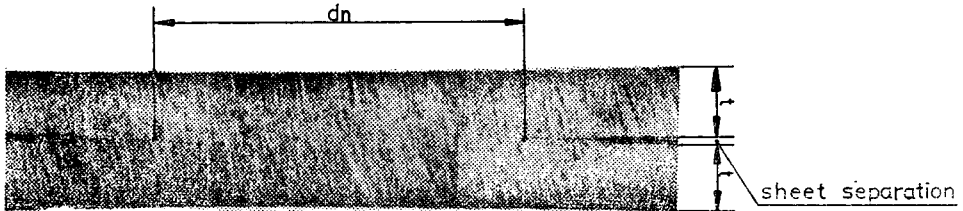


Photo 1 Nugget diameter on cross section of spot welded nugget (×20), $d_n=5.74\text{mm}$ when $t=1.0\text{mm}$, $d_e=5.0\text{mm}$, $P_e=225\text{kg}$

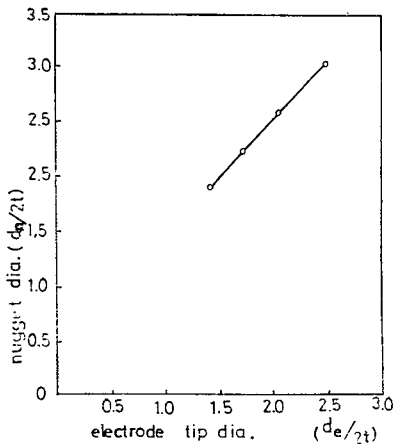


Fig. 5 Nugget diameter versus electrode tip diameter by experimental analysis

容量 70KVA, 220V, 60Hz, 水冷式, 空氣壓 3kg/cm² 型이었다.

3.2. d_n 의 測定 및 d_n 과 d_e 의 關係

點熔接된 試驗片은 變形되지 않도록 조심하여 細工 用 실패으로 中央斷面을 切斷한 後, 마지막 研磨作業 에는 1000# 砂布를 使用했다. 金屬顯微鏡으로 斷面을 檢査한 結果 너깃지름 d_n 은, 板두께 1mm인 境遇 Photo 1에 나타낸 바와 같이 正確히 測定 할 수 있었

다. Photo 1에서는 固着이 되어진 sheet separation 과 함께 너깃지름이 明確히 드러나 있으며, 이러한 實驗方法으로 測定된 d_n 의 값을 d_e 와의 關係로 나타낸 것이 Fig. 5이다. d_n 은 d_e 에 比例함을 알 수 있으며 이와같은 結果를 式으로 表現하면 d_n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_n = (1.05)d_e + (0.8)t \tag{11}$$

4. 彈性計算值의 活用に 對한 評價

彈性計算에서는 電極 加壓力에 依한 分布壓力 q 가 定해지면, 板두께 t 및 電極지름 $2a(2a=de)$ 일때 板間 任意的 位置와 있어서 引張應力 $+\sigma_z$ 와 壓縮應力 $-\sigma_z$ 가 Fig. 3으로 플롯트 되어졌다면, 壓縮應力이 引張應力으로 交替되는 點의 位置를 알 수 있게 되는데 이 點이 바로 sheet separation 始發點이 된다. 이때 壓縮應力을 받는 部分이 板間接觸部로써 이 板間接觸部의 接觸面積의 大小가 電流密度를 決定하여 너깃지름의 크기를 左右하는 重大한 要因이 되는 것이다. 壓縮應力을 받는 部分의 지름 即 板間接觸지름 $2r_0$ 와 電極 지름 d_e 와의 關係는 Fig. 3으로부터 導出하여 다시 Fig. 6에 實線으로 나타냈다. 同時에 實驗結果에 依한 너깃지름의 測定値는 點線으로 區別하여 함께 Fig. 6

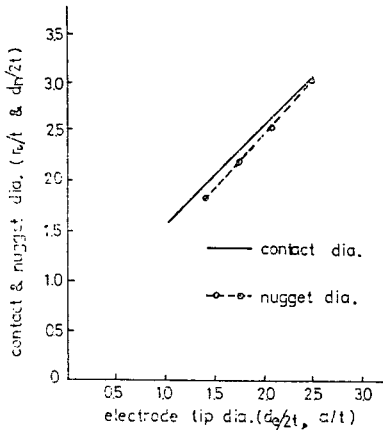


Fig. 6 Contact & nugget diameter versus electrode tip diameter by theoretical & experimental analysis when $\sigma_z/q=0$, (r_0 ; contact radius)

에 表示하였다. 板間接觸지름 $2r_0$ 는 이러한 直線性을 감안하여 다음 結果式으로 간단히 表現 할 수 있겠다.

$$2r_0 = d_n + (1.1)t \quad (12)$$

이 式 (12)를 實驗으로 測定한 d_n 의 結果式인 式 (11)과 比較해 볼 때 $d_n \approx 2r_0$ 로써 d_n 이 板間接觸지름 $2r_0$ 보다 平均적으로 0.8~4.3% 더 낮게 나타났다. 이것은 通電이 된 以後의 熔着過程에 있어서도 板間接觸지름이 거의 처음과 같이 그대로 維持되었다는 것을 말해주는 것이 된다. 여기서 板間接觸지름이 너깃지름보다 오히려 크게 나타나는 이유에 對해서 잠시 살펴 보겠다. 板間接觸된 表面이 接觸 않된 裏面에 비해 우선적으로 熱膨脹⁽⁸⁾하여 板間接觸面에 또 다른 引張應力이 誘起되고 sheet separation 始發點은 電極中心線쪽으로 向해 後退한 것으로 믿어진다. Sheet separation 始發點 밖의 非接觸面에는 電流가 흐를 수 없으므로 電氣抵抗熱은 發生하지 않으며 傳導熱만으로서 는 融點까지 到達하지 못하게 된다. Greenwood⁽⁹⁾ 등에 依하면 너깃端 바로 바깥 部分의 溫度는 700°C 程度에 불과하다고 한다. 더군다나 非接觸面에는 급격히 酸化膜이 生成 및 介在되어 壓接마저도 容易하지가 못하다⁽¹⁰⁾. Fig. 6에서 板두께에 비해 相對적으로 電極지름이 훨씬 더 큰 電極을 使用할 수록 板間接觸지름과 너깃지름의 差異는 점차 줄어들고 있다. 日常 板金作業에 많이 利用되고 있는 두께 $t=3\text{mm}$ 以下の 薄鋼板點熔接의 境遇, 두께에 비해 큰 지름의 電極들 即 $de/2t \approx 2.5$ 의 것이 많이 使用되고 있으므로 이 程度 $2r_0$ 와 d_n 의 差異(0.8%)는 없는 것으로 看做해도 無放하다고

본다. 그러므로 너깃지름의 彈性學的 豫測은 實際 經驗의인 境遇와 相當히 接近하고 있으므로 式 (11) 혹은 (12)는 點熔接設計時 간단한 계산에 依해 活用 되어질 수 있을 것이다.

5. 結 論

點熔接設計에 있어서 너깃(nugget)지름의 事前 豫測이 必須의으로 要求된다. 本論文에서는 彈性計算 및 點熔接 試驗片의 斷面觀察에 依해 너깃지름의 豫測方法을 提示했다. 即 各種 車輛 및 家電製品의 製作에 많이 使用되는 冷間壓延된 炭素鋼板 2枚를 두께가 서로 같은 것끼리 組合하여 1點 點抵抗熔接 하였을때 너깃지름 d_n 은, 電極 지름 d_e 및 板 두께 t 가 주어지면 彈性計算에 依한 板間接觸지름 $2r_0$ 와 깊은 關聯성을 가지고 있는 것을 알았다. 얻어진 結果를 要約하면, 아래 事實들로 結論지을 수 있다.

(1) 彈性計算으로 부터나온 板間接觸지름 $2r_0$ 는 實用性 있고 간단한 式, $2r_0 = d_n + (1.1)t$ 로 나타낼 수 있다.

(2) 實際의 너깃지름 d_n 을 測定한 結果, $d_n = (1.05)d_e + (0.8)t$ 로 나타나서 너깃지름은 板間接觸지름 보다 0.8~4.3% 더 작았다.

(3) 板두께에 비해 電極지름이 커질수록 이와같은 理論値와 實驗値의 差異는 작아진다.

(4) 日常 板金作業에 많이 使用되고 있는 板 두께 3mm 以下の 薄鋼板點熔接에 있어서 板間接觸 지름이 바로 너깃지름이 된다. 이때에는 理論式이나 혹은 實驗式 中에서 어느 式을 活用해도 熔着지름의 豫測이 可能하게 된다.

參 考 文 獻

- (1) Zeitschrift Angew. Math. Mech., Vol. 12, p. 343, 1932.
- (2) Recommended Practice for Resistance Welding, pp. 5~9, Resistance Welding Committee, A. W.S., New York, 1966.
- (3) Resistance Welding Manual, 3rd. ed., p. 126, RWMA, Philadelphia, 1956.
- (4) Colangelo, Heiser, Analysis of Metallurgical Failures, pp. 345~354, John Wiley & Sons, 1974.
- (5) Iam N. Sneddon, Fourier Transforms, p. 412,

- McGraw-Hill, 1961.
- (6) Timoshenko, Goodier, Theory of Elasticity, 2nd. ed., pp. 53~59, McGraw-Hill, 1970.
- (7) R. Chand, E.J. Haug, K. Rim, Analysis of Unbonded Contact Problems by Means of Quadratic Programming, J. of Optimization Theory and Applications, Vol. 20—2, pp.178~180, Oct., 1976.
- (8) S. Bhattacharya, Grad.I.E.R.E., et. al., Resistance Weld Quality Monitoring, Sheet Metal Industries, p.463, July, 1972.
- (9) J.A. Greenwood, K.P. Bently, et. al., Brit. Weld. J., Vol. 10—12, p.613, 1963.
- (10) R.F. Tylecote, Properties of Oxides and Oxidized Metal Surfaces, Solid Phase Welding of Metals, pp.42~45, Edward Arnold, London, 1968.