

# 스텐레스 차체 스폿용접부의 최적 피치 선정에 관한 연구

## A Study on the Selection of Optimal Spot-weld Pitch for The Stainless Steel Car-body

서승일\*                      차병우\*\*  
Seo, Seung-il      Cha, Byoung-woo

### ABSTRACT

The pitch of spot-weld is a important variable in a view of both production cost and strength of car-body. Various conditions for the selection of pitches have been researched and especially in this paper the buckling analysis is carried out for the 2-sheet pannel structures. The optimal pitch is obtained by optimization program and FEM, which can enhance the buckling strength.

### 1. 서 론

철도차량의 스폿용접은 외판과 골조를 접합하는 중요한 수단으로 사용되어 오고 있다. 이러한 스폿용접은 여러 타점을 용접할수록 구체의 강도는 높아지지만, 차량 제작시 사용되는 시수의 절감 측면에서는 타점수를 줄일수록 생산성이 향상되고, 외판의 평활도 측면에서도 타점수가 작은 것이 좋다. 이러한 스폿용접의 타점수와 피치가 특히 중요하게 고려되어야 하는 경우가 있는데, 그것은 2-sheet pannel공법으로 제작하는 경우이다. 현재 스텐레스 전동차를 2-sheet pannel공법으로 제작하는 경우에 스폿용접의 타점수를 줄이면서 구체의 강도를 일정 수준이상으로 유지하는 것이 설계상 중요한 관점이 된다.

본 연구에서는 스폿용접부의 타점수를 감소시키기 위해 스폿용접부의 적정피치를 어떠한 원칙하에 결정할 수 있는가를 고찰하였고, 이를 토대로 최적의 스폿용접부 피치를 어떻게 구할 수 있는가에 대한 연구를 수행하였다.

### 2. 스폿용접부의 피치 결정

#### 2.1 스폿용접부의 피치 결정을 위한 기본 원리

JIS를 비롯한 각종 규격과 참고문헌을 통해 조사한 스폿용접부의 피치 결정 원칙은 다음과 같이 요약할 수 있다.

---

\* 한진중공업 연구개발부 책임연구원, 회원

\*\* 한진중공업 연구개발부 연구원, 비회원

- (1) 스폿용접부의 이음 효율에 따라 피치를 결정하는 방법
- (2) 차체의 구조 해석 결과에 따라 얻어진 스폿용접부의 전단력을 기초로 피치를 결정하는 방법
- (3) 외판의 좌굴강도를 최대로 하기 위한 피치 조절 방법
- (4) 스폿용접부의 전기적 특성 고려 및 결함 발생 억제를 위해 피치를 제한하는 방법

스폿용접부의 피치는 상기에 기술한 하나의 원리에 의해서 결정되는 것이 아니라 복합적으로 고려하여야 하고, 차체의 위치별로 다른 원칙에 의해 결정될 수 있다.

### 2.3 이음 효율에 따라 피치를 결정하는 방법

JIS에서는 연강 철도차량의 스폿용접 피치 결정식이 소개되어 있으나, 스텐레스 철도차량의 스폿용접 피치는 당사자간의 협의에 따라 결정하도록 규정되어 있다[1]. 그러나 연강 철도차량의 스폿용접부 피치 결정식은 스텐레스 차량 피치 결정에 기초가 될 수 있다. 연강 철도 차량의 스폿용접부 피치 결정식은 다음과 같다[2].

$$\frac{C}{e} = 0.33T^{0.2} \quad (1)$$

여기서,  $C = \frac{\sum D}{\sum l} =$  연속도

$D = 6\sqrt{T} =$  너겟의 직경

$l =$  피치

$T =$  호칭 판두께

$e = \frac{R}{L} =$  이음의 효율

$R =$  스폿용접 1타점에 작용하는 인장전단하중

$L =$  모재의 인장강도 $\times$ 스폿용접 1타점당 이음의 최소단면적

균일한 피치가 연속되는 경우에 (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$l = 18.18 \frac{T^{0.3}}{e} \quad (2)$$

(2)식을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 따르면 판두께가 증가함에 따라, 이음효율이 감소함에 따라 피치는 증가함을 알 수 있다. 이음효율이 감소한다는 것은 스폿용접 타점에 작용하는 하중이 감소한다는 것을 뜻하고 피치는 스폿용접 타점에 작용하는 전단하중에 반비례하여 결정됨을 알 수 있다.

이음효율은 보통 25%를 표준으로 하는데, 수밀을 요하고 이음효율이 높은 경우를 45%로, 이음효율이 낮은 경우를 20%로 취하는 것이 일반적이다. 이음효율이 정해지면 피치는 판두께의 함수가 된다.

### 2.3 구조 해석을 통해 피치를 결정하는 방법

구조 해석을 통해 피치를 결정하는 방법은 먼저 구조 해석을 통해 스폿용접 타점에 작용하는 전단력을 계산하고 스폿용접 타점의 허용 전단하중과 비교하여 안전성을 검토하는 방법이다. 허용 전단하중은 JIS 등의 규격에서 규정한 값을 활용하게 된다.

구조 해석을 통해 스폿용접부의 안전성을 검증해 보는 절차는 Fig. 2와 같다.

## 2.4 좌굴 강도 관점에서 피치를 결정하는 방법

차체 외판과 골조는 스폿용접에 의해 결합되고 외판은 골조에 의해 보강되어 항복과 좌굴 발생이 억제되게 된다. 스폿용접은 불연속적으로 진행되므로 스폿용접부 사이의 외판은 압축 또는 전단 하중에 의해 국부적으로 좌굴이 발생될 수 있다. 외판의 좌굴은 차체 전체강도를 저하시키고 미려도를 저해하므로 억제되어야 하는데, 스폿용접 피치에 의해 외판 좌굴강도가 변화하므로 피치의 결정은 중요하게 된다.

Side structure는 차체 하중의 상당부분을 지지하는 구조로서 인장응력뿐 아니라 압축과 전단응력을 받고 있다. 내부 골조에 의해 보강된 외판에서는 스폿용접 타점의 위치에 따라 외판의 지지점이 달라지므로 좌굴강도가 크게 영향을 받게 된다. 적정 스폿용접 타점의 위치를 결정함으로써 차체의 강도 향상에 기여할 수 있다. 기본적인 피치가 초기설계에서 결정되면 임의의 피치의 변경에 따라 좌굴강도가 최대가 되는 경우를 최적 피치로 선정할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 2-sheet pannel에서 기본 피치가 정하여져 있고 내부 pannel의 a, b, c 피치만을 결정하는 경우로 국한시켜서, 좌굴강도를 최대로 할 수 있는 최적 피치값을 구하였다.

### 2.4.1 최적화 정식화 및 결과의 비교

본 연구에서는 피치의 연속적인 변화에 대한 최대 좌굴강도를 갖도록 하는 최적의 스폿용접점의 피치를 결정하기 위하여 FEM S/W로서 ANSYS[4]를 이용하여 최적화를 수행하였다.

최적화를 수행하기 위해서는 y 방향 좌굴응력(이하 좌표계는 Fig. 3에 명시된 좌표를 따름)이 최대가 될 수 있는 목적함수와 설계변수 및 상태변수의 제한조건이 필요하며, 이는 다음과 같다.

$$\text{목적함수} = \frac{1}{\sigma_{cr}} \quad (3)$$

$$\text{설계변수} = a, b, c \quad (4)$$

$$\text{제한조건} : 10 < a < 110 \text{ [mm]} \quad (5)$$

$$10 < b < 110 \text{ [mm]} \quad (6)$$

$$10 < c \text{ [mm]} \quad (7)$$

$$5 < \sigma_{cr} \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (8)$$

초기치를 a=77, b=77, c=78 [mm]의 간격으로 주고, y 방향 좌굴응력이 최대가 되도록 하기 위해 목적함수를 좌굴응력의 역수를 사용했으며, ANSYS에서 지원하는 최적화 방법으로 Sub-problem Method로 피치를 선정한 후에, 이를 다시 초기치로 하여 First-order Method로 좀 더 정확히 최대 좌굴응력값을 갖는 피치를 선정하였다. 초기

mesh와 경계조건은 각각 Fig. 4, Fig. 5과 같고, 재질은 SUS304로서 탄성계수=19,700 kgf/mm<sup>2</sup>, Poisson's ratio=0.3을 주었다. 스폿용접점은 절점의 공유로써 구현하였다.

최적화의 결과로서 처음 Sub-problem Method를 이용한 결과는 Fig. 6과 Fig. 7와 같이 a=63.64, b=56.91, c=111.45 mm 일 때,  $\sigma_{cr}=6.216$  kgf/mm<sup>2</sup>의 값으로 나타나며, 이를 초기값으로 다시 First-order Method를 이용하여 최적화를 수행한 최종 결과는 Fig. 8와 Fig. 9에서 알 수 있듯이 a=67.82, b=58.13, c=106.05 mm일 때,  $\sigma_{cr}=6.225$  kgf/mm<sup>2</sup>로 구해진다. 이 결과치는 본 모델에서 최대 좌굴응력을 가질 수 있는 피치를 보여준다.

## 2.4.2 요철(Corrugation)의 변화에 따른 최적의 피치 변화

현재 2-sheets 구조로써 제작중인 전동차의 기본구조를 모델링하면 Fig. 10과 같다. 단, 앞 절과의 비교를 위해서 외판 및 내판의 두께는 각각 1.2 mm, 0.8 mm 로 해석하였으며 경계조건은 Fig. 5와 같다. 이 모델에서는 요철(corrugation)의 형상이 y 방향 좌굴강도가 높아지도록 설계되었다는 것을 알 수 있다. 이 때의 y 방향 좌굴강도를 최대화하는 피치는 a=75.17, b=66.31, c=90.52 mm 이며, 최대 y 방향 좌굴강도는  $\sigma_{cr}=6.94$  kgf/mm<sup>2</sup>의 값을 갖는다(Fig. 11, 12, 13, 14 참조).

이와 더불어 x 방향 좌굴강도를 검토하였으나, x 방향 좌굴강도는 a, b, c 피치의 영향이 거의 없었다.

## 2.5 스폿용접부의 전기적 특성 고려 및 결합 억제를 위해 피치를 제한하는 방법

스폿용접은 전극 사이의 통전 및 모재의 저항 발열에 의해 접합이 이루어지는 용접 방법인데, 전극 사이의 통전 시에 Fig. 15와 같이 인접 부근에 스폿용접부가 존재할 때 분류(branch current)가 발생하여 저항 발열이 충분히 이루어지지 않으므로 용접 결합이 발생할 수 있고, 인접 용접부에 흐르는 전류로 인해 인접 용접부에 발열이 발생하여 접합부가 분리될 수 있다.

또한, 스폿용접부가 모재의 끝단에 인접하게 되면 용접부에서 용출(溶出, expulsion)이 발생하여 용접 결합이 되고, 끝단(edge)에 인접한 부근에서는 모재의 강도 부족으로 전단에 의해 찢어짐이 발생할 수 있다. 이런 상황을 고려하여 JIS에서는 Table 1과 같이 최소 피치 및 최소 끝단 거리를 제한하고 있다[2].

## 3. 결론

스텐레스 차체는 스폿용접에 의해 조립되고 있고 적정한 스폿용접부의 강도는 차량의 안전을 위해 극히 중요하다. 스폿용접부의 위치 및 피치는 이음효율, 인장전단강도, 좌굴강도, 스폿용접의 전기적 특성 등 다양한 기준에서 결정되며, 차체의 각 부위별로 적절한 기준이 채택될 수 있다.

본 연구에서는 스폿용접부의 피치 결정 기준의 이론적 배경과 적용 원리를 제시하고, 각 기준에 따라 피치를 결정하는 구체적인 방법을 모색하였다. 또한 최적의 피치를 결정하기 위해 최적화의 방법을 도입하기도 하였다.

본 연구의 결과는 전동차 차체 스폿용접부 설계의 이론 정립에 기여할 것으로 사료되고, 연구 결과의 활용을 통해 스폿용접부 타점수의 절감이 가능할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] "Welded joints of stainless steel for railway rolling stocks - Design methods", Japanese Industrial Standards, E4049, 1990.
- [2] "Railway rolling stock - Spot welded joints of mild steel - Design methods", Japanese Industrial Standards, E4048, 1994.
- [3] "次世代通勤車兩試作車の概要", 川崎重工業(株), 1991.
- [4] "ANSYS User's manual", SWANSON Analysis Systems, Inc., 1992.
- [5] "부산시 2호선 전동차 구체강도 계산서", (주)한진중공업, 1996.
- [6] 中村孝, 小林徳夫, 森本一, "抵抗溶接", 現代溶接技術大系, 産報出版, 1980
- [7] 小平裕明, 座司孝雄, "最近の車兩構体輕量化の技術", 電氣車の科學, Vol. 45, No. 11, 1992.

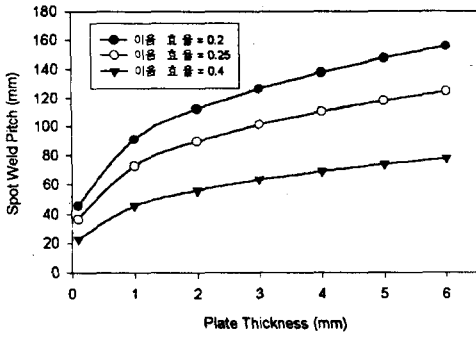


Fig. 1 이음효율 및 판두께에 따른 스폿용접부의 피치 변화

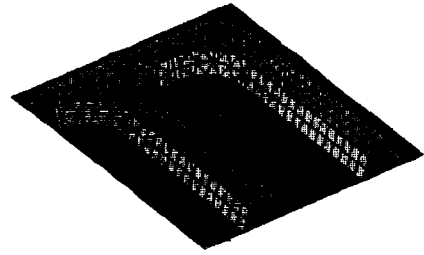


Fig. 4 좌굴해석을 위한 2 Sheets 기본구조의 1/4 모델링

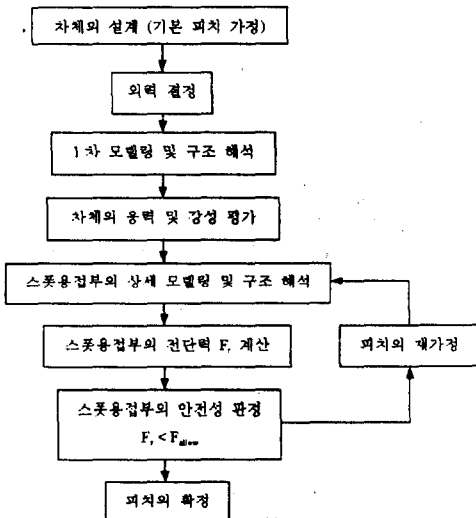


Fig. 2 스폿용접부의 강도 검증 절차

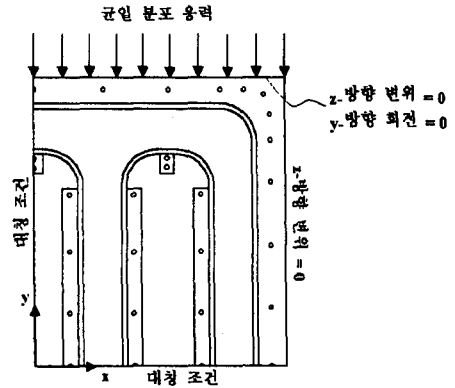


Fig. 5 y-방향 좌굴 해석을 위한 경계조건

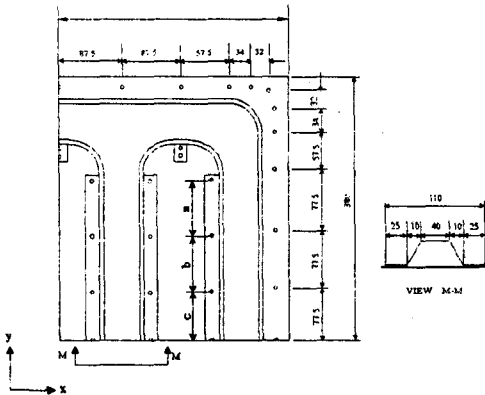


Fig. 3 점용접점의 위치(1/4 모델)  
(두께 : 내판=0.8 mm, 외판=1.2 mm)

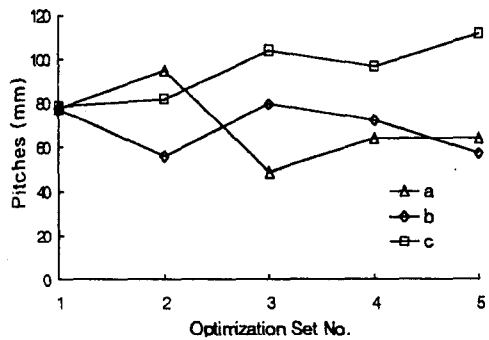


Fig. 6 Sub-problem Method를 이용한 피치의 1차 최적화 (Fig. 4 모델의 해석결과)

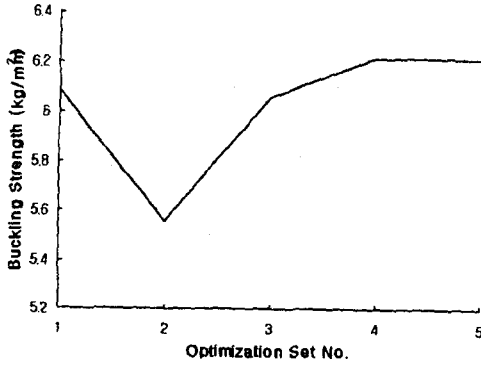


Fig. 7 Fig. 6의 피치 변화에 따른 좌굴강도 변화 (Fig. 4 모델의 해석결과)

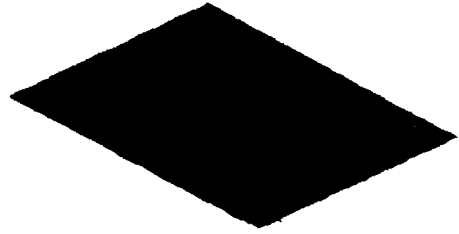


Fig. 10 요철 형상이 다른 기본 구조의 1/4 모델링

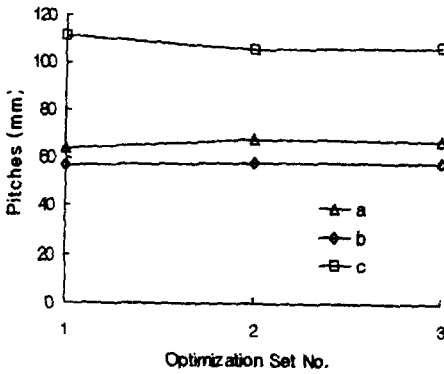


Fig. 8 First-order Method를 이용한 피치의 최종 최적화 (Fig. 4 모델의 해석결과)

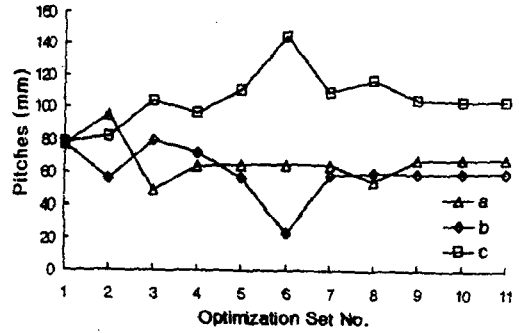


Fig. 11 Sub-problem Method를 이용한 피치의 1차 최적화 (Fig. 10 모델의 해석결과)

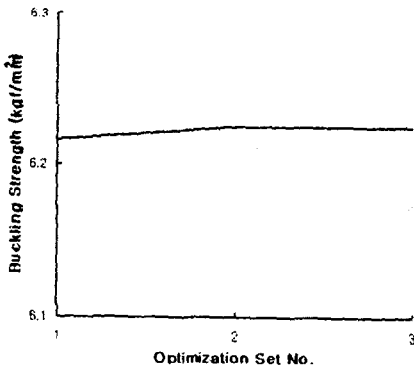


Fig. 9 Fig. 8의 피치 변화에 따른 좌굴강도 변화 (Fig. 4 모델의 해석결과)

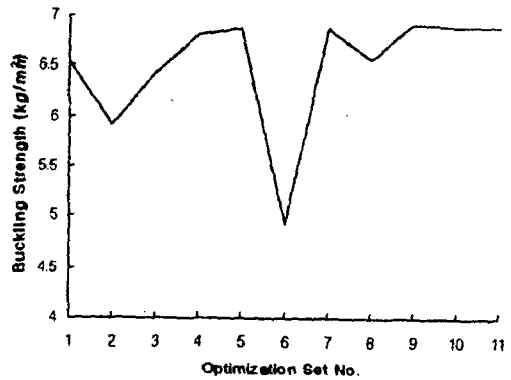


Fig. 12 Fig. 11의 피치 변화에 따른 좌굴강도 변화 (Fig. 10 모델의 해석결과)

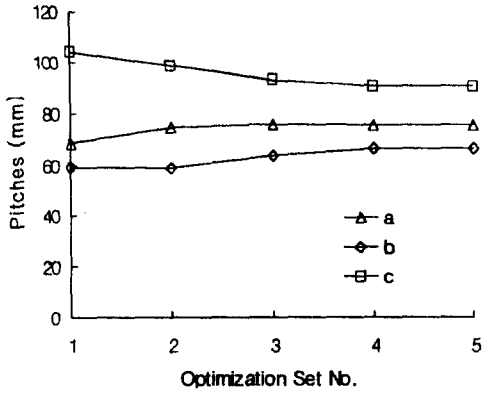


Fig. 13 First-order Method를 이용한 피치의 최종 최적화 (Fig. 10 모델의 해석결과)

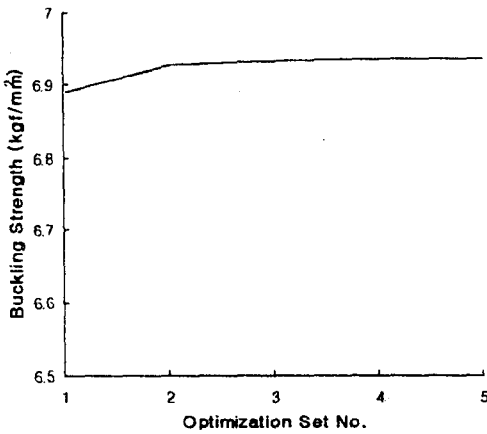


Fig. 14 Fig. 13의 피치 변화에 따른 좌굴강도 변화 (Fig. 10 모델의 해석결과)

Table 1 최소 피치 정의

판두께 (mm)	최소단 길이 $E_{min}$	최소 용접피치, $D_{min}$	
		$T < 2.5t_1$	$T > 2.5t_1$
0.4	3	9	11
0.5	4	10	13
0.6	4	12	15
0.8	5	14	18
1.0	6	17	21
1.2	7	19	24
1.5	8	22	28
2.0	10	27	34
2.5	12	32	40
3.0	14	36	46
3.5	15	40	51
4.0	17	44	56
4.5	18	48	60
5.0	20	52	65

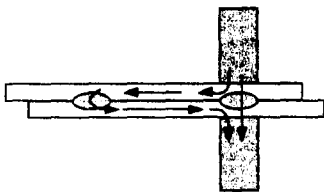
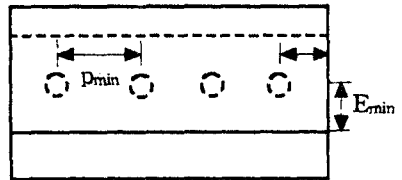


Fig. 15 인접한 스폿용접부에 의한 分流