압연기술의 미래개척, 이준정, 황상무 편
한국소성가공학회, 대한금속학회 1999 pp.327~335

연연속 압연 공정에서 판 접합 공정의 응력해석

정제숙*, 김호영*, 이종섭**
압연프로세스연구팀, 포항산업과학연구원*
설비.용접연구팀, 포항산업과학연구원**

Stress Analysis in Bar Welding Process for Endless Rolling Application

J. S. Chung*, H. Kim* and J. S. Lee**
Rolling Process Res. Team, RIST*
Welding & Structural Integrity Res. Team, RIST**

ABSTRACT

A batch process in which transfer bars are rolled in single bar units involves many problems in terms of quality, yield and threading stability. The endless rolling process is an effective solution to such problems. In this study, an analysis model is proposed to calculate the distribution of normal stress in endless rolling process. The model was examined by comparing with the result of experiment. A device using the spring is developed for improving the welding quality.

Key word : Endless Rolling, Bar Welding

1. 서론

연연속 압연은 일본제철소를 중심으로 10여년 전부터 기초 연구가 진행 되어 온 공정으로, 두 개 이상의 판재를 roughing mill 에서 finishing mill 까지 연속적으로 압연하는 공정이다. 각 제철소에서 개발하고 있는 연연속 압연의 구체적인 설비에서는 다소간의 차이는 있지만, Fig. 1 과 같이 기존 열연 설비에 coil box, bar to bar welder, strip shear 장치를 추가한다는 개념에는 차이가 없다.[1] Roughing mill 을 거쳐 운송된 판재는 coil box 에서 적절한 시간에 bar to bar welder 로 공급되고, 판재는 용접 되어 finishing mill 로 보내진다. Finishing mill 을 통과한 판재는 냉각되어 strip shear 에 의해 일정 길이로 절단되어 coil 형태로 coiler 에 감겨져 제품화 된다. Finishing mill 직전에서 판재를 접합 시켜 판재를 연속으로 압연하는 연연속 압연의 목적은 다음의 몇몇 사항으로 정리할 수 있다. 첫째, 판재에 장력을 부과할 수 없는 전 후단부에서의 품질을 향상시킬 수 있다. 연연속 압

연에서는 보통 10 매 단위의 판재를 연연속 압연하는 것을 한 주기로 설정한다. 그러므로 기존 압연에서 매 단위별로 판재의 전 후단부에서 발생하는 여러 문제점을 해결할 수 있다. 둘째, 향상된 품질의 박물재를 안정적으로 생산할 수 있다. 박물재의 경우 coiler 의 입측에서 좌우 guide 나 상단 guide 에 부딪칠 위험이 많고, 이로 인해 냉각설비에서 판재에 wave 가 발생할 위험이 높다. 또 판재의 후단부는 pincher 가 발생할 위험이 있으나 연연속 압연에서는 이러한 위험 가능성을 현저히 줄일 수 있다. 셋째, 일반적인 열연에서 생산 불가능한 극박재나 광폭재의 생산이 가능하다. 넷째, 유압연 등에 의하여 새로운 재질에 대한 향상된 품질의 판재 생산할 수 있다. 연연속 압연에서는 용접 된 판재의 처음 부분만 롤에 삽입되고 나면 나머지 부분은 계속해서 윤활이 가능하므로 많은 윤활이 필요한 재질에 대하여 고품질의 제품을 안정적으로 생산할 수 있다.

연연속 압연공정의 핵심 기술은 판재 접합기술로, 20 초 이내에 20~40mm 두께의 1900mm 폭의 판재까지도 용접이 가능해야 하고, 장력이 걸려도 접합부위가 떨어지지 않을 만큼의 접합성이 보장되어야 한다. KSC(Kawasaki Steel Company)에서는 MHI(Misubishi Heavy Industry)와 공동연구로 유도가열 방식의 접합 방법을 개발하였고, Chiba #3 열연공장에 설치하여 1996 년부터 조업에 들어갔다[2]. NSC(Nippon Steel Corporation)에서는 판재 용접 방법으로 laser welding(45kW CO_2 laser)을 채택하여 장비를 가동하기 시작하였다. 접합은 이송중인 판재를 대상으로 하며 판재의 접합상태뿐 아니라 접합속도도 제품의 생산성에 영향을 미치므로 중요한 공정 변수이다. 본 연구에서 사용한 판재의 접합방법은 판재를 절단과 동시에 기계적으로 하중을 가하여 접합 시키는 압착식 용접 방법이다. 공정이 순간적으로 일어나므로 접합성만 보장된다면 다른 방법보다 생산성이 뛰어나며 판재를 고체상태에서 용접하므로 적은 에너지로도 용접이 가능하다. 기존에 알려진 압착식에 의한 판재 접합의 경우 판재의 가장자리에서 접합성이 떨어지며, 판재의 폭에 따라 접합정도가 달라지는 문제점이 있었다. 압착식에 의한 판재용접은 절단과 용접이 동시에 일어 나는 복잡한 공정이다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 공정을 단순화 시켜 간단하게 공정을 모사 할 수 있는 모델을 제시하였고, 제시된 모델에 의해 얻은 결과를 실험치와 비교하여 해석의 신뢰도를 검증하였다. 또 기존의 공정이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위하여 새로운 방법을 제시하였다.

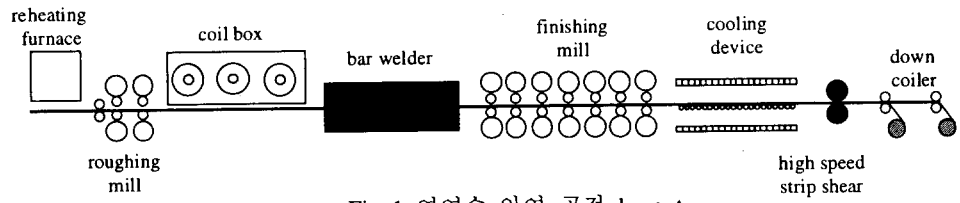


Fig. 1 연연속 압연 공정 lay out

2. 연구내용

본 연구에서는 연연속 압연공정에서 압착식에 의해 판재를 용접하는 공정에 대하여 공정을 간단히 모사할 수 있는 모델을 제시하고, 이 모델을 이용하여 수치해석을 통하여 공정을 시뮬레이션 하였다. 본 연구는 두 단계로 나누어진다. 먼저 기존의 장치로 압착식에 의한 판재 접합시 판재의 접합 부위에 분포하는 접합력을 예측하였다. 접합력을 결정하는 변수는 소재의 온도, 표면의 접촉면적, 표면상태, 소재의 접촉력, 접촉경로 등 여러 요인이 작용하지만 수치해석을 이용한 본 연구에서는 소재의 용접 상태는 단지 두 소재의 접촉면에 작용하는 수직응력의 크기에 비례한다고 가정하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하였다. 절단과 용접이 일어나는 과정을 근사화 시켜 해석을 수행한 다음 접합면에 작용하는 수직 응력 분포를 계산하여 접합면의 건전성을 평가할 수 있는 자료로 활용하였다. 이 결과는 실제 압착식에 의해 용접된 판재를 인장 실험한 결과와 비교하여 접합부위와 비접합 부위를 판단할 수 있는 방법을 설정하는데 이용하였다. 2 단계 연구에서는 1 단계 연구를 통하여 설정된 접합력의 판단기준을 바탕으로 접합력을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 일반적으로 소성가공 공정에서 단조와 같이 소재에 upsetting 힘을 가하면 가해진 힘의 방향으로는 두께가 줄어들지만 체적을 유지하기 위하여 다른 두 방향으로 팽창한다. 이때 팽창하려는 방향으로 구속을 가하면 소재는 힘을 받게 되고 이 힘은 upsetting 힘에 비례하여 커진다. 이 원리를 이용하여 2 단계 연구에서는 간단한 장치를 이용하여 판재의 접촉면에 작용하는 수직력을 향상시킬 수 있었다.

3. 연구결과 및 논의

3.1 기존 용접방법

본 연구의 대상인 압착식에 의한 용접은 두개의 판재를 이송 중에 판재의 일부분을 Fig. 2 와 같이 겹친 후 순간적으로 양 끝을 clamp 로 고정하고 펀치로 눌러 판재를 절단과 동시에 압착 시키는 방법이다. Clamp 가 판재를 고정한 후 펀치가 이동하게 되면 아래쪽 판재의 길이가 감소하게 된다. 체적은 일정하게 유지되므로 길이가 줄어든 만큼 다른 방향으로 늘어나며, 이때 고온인 판재의 용접면에 큰 압력이 걸리면서 용접이 일어난다. 공정은 비정상 상태에서 절단과 용접이 동시에 일어나는데, 이러한 공정을 그대로 모사하기 위해서는 판재의 절단과정을 시뮬레이션 할 수 있어야 하고 용접이 일어난 부위를 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 그러나, 대변형이 일어나는 현상의 해석 시 문제가 되는 격자 재구성 (remesh)문제와, 해석에 사용되는 CPU time, 용접성 평가기준 등의 많은 원인으로 현상을 그대로 모사하여 해석하기는 불가능하므로 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 간략화 된 모델을 이용하였다. 제시된 모델은 이미 판재가 어떤 각도로 절단되어진 후 접합될 부분이 강체와 접촉해 있다고 가정한다. 기울어진 각도는 실험에서 얻어진 용접각을 이용하였으며, 판재의 용접면과 강체사이에는 마찰력을 부여하여 실제 절단시 판재가 받는 하중과 동일한 메커니즘을 가지도록 구성하였다. 용접성의 평가 기준은 다양한 요인들이 있겠지만 본 연구에서는 오직 접촉면의 수직응력에 용접성이 비례한다고 가정한다.

해석은 판재의 폭 방향으로 대칭이므로 1/2 모델만으로 계산하였으며 판폭 250mm, 500mm 인 경우에 대하여 계산하였다. Fig. 4 에는 폭 250mm 에 대하여 계산 후 얻은 용접면의 수직응력 분포를 도시하였다. 폭의 변화에 대하여 수직응력 분포에는 큰 차이를 보이지 않았지만 전체적으로 판재의 중앙부에서 일정한 거리만큼은 상대적으로 큰 응력이 작용하고 있으며 가장자리로 갈수록 작은 응력분포를 나타냄을 알 수 있다. HITACHI 사에서는 판 폭 250mm, 500mm 인 경우에 대하여 실험을 통하여 압접 후 폭 방향으로 일정한 간격으로 절단하여 인장실험을 수행하였는데, Fig. 5 에 결과를 나타내었다. 판재가 용접된 상태에서 인장력을 받게 되면 판재의 접합면 가운데 용접이 일어난 부분에서만 힘을 받게 된다. 즉 용접이 일어나지 않은 상태에서는 인장력을 받을 수 없으며 용접 상태에 따라 부위별로 받는 힘의 크기도 다르다. 본 연구에서는 계산을 통하여 얻은 수직응력 분포를 바탕으로 용접이 일어난 부위를 예측하기 위하여 다음과 같은 과정을 거쳤다. 용접이 이루어진 정도를 예측하기 위해 각각의 값까지 용접이 일어 났다고 가정하고 용접부위에 걸리는 힘을 계산한다. 이때 힘은 작용하는 수직응력에 그 값이 걸리는 면적을 곱하여 얻었다. 해석 결과는 많은 가정이 들어 있으므로 실험값과 바로 비교하기는 곤란하여 가장자리 값을 기준으로 폭 방향으로 상대적인 값을 비교하였다. Fig. 6 에는 판재의 폭 250mm 와 500mm 에 대한 결과가 나와 있는데, 실험치는 응력값 가운데 4 또는 5 까지 용접이 일어났다고 가정한 결과와 잘 일치한다.

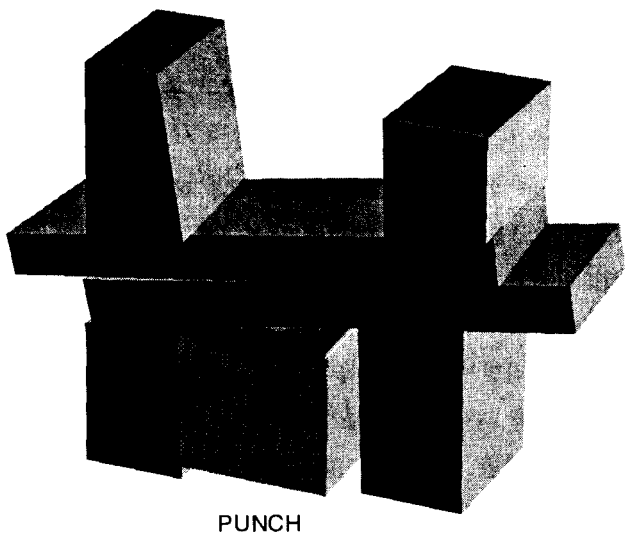


Fig. 2 기존 장치에 대한 모식도

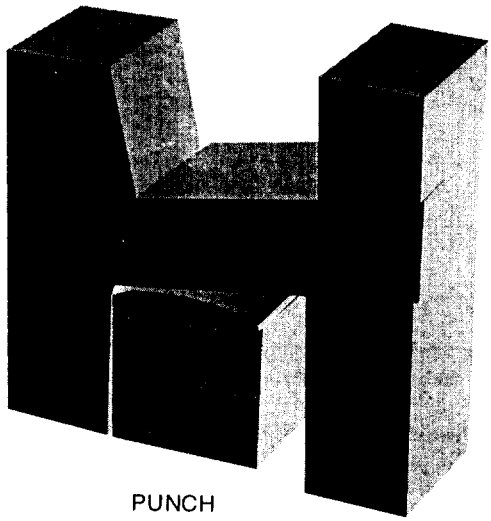


Fig. 3 해석에서 가정한 장치의 모식도

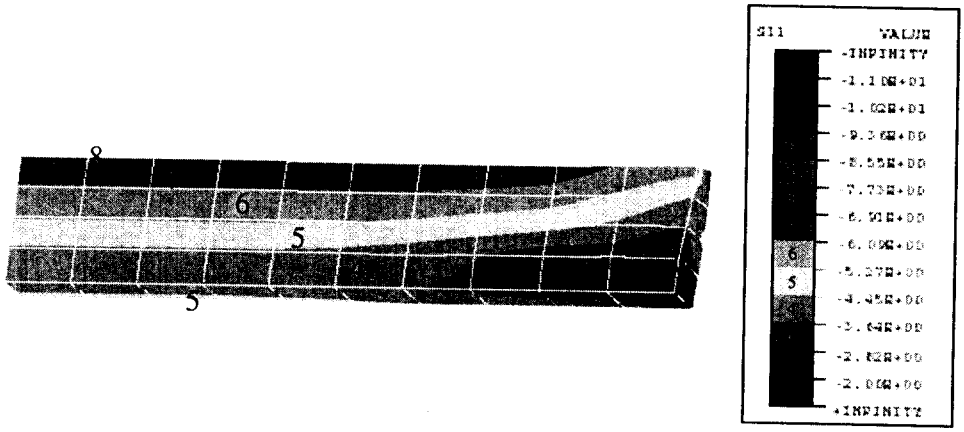


Fig. 4 용접면에서의 수직 응력 분포(판폭=250mm)

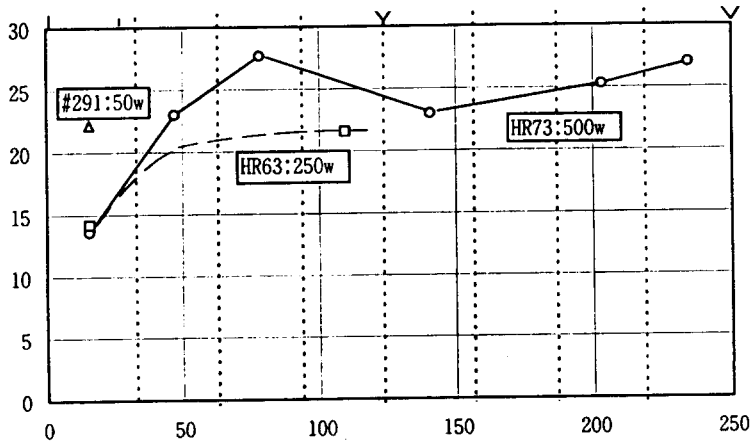


Fig. 5 실험을 통해 얻은 인장력 분포

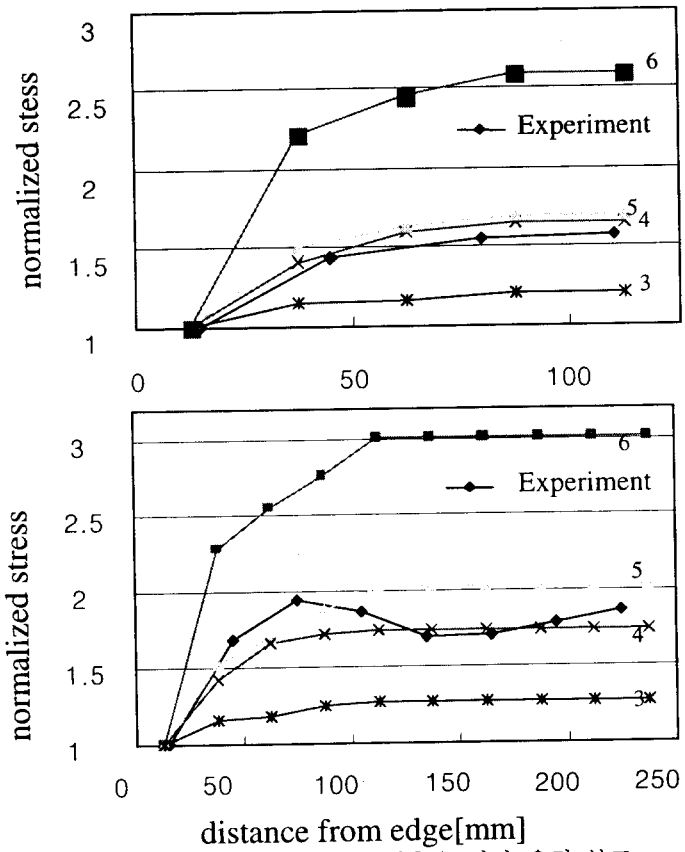


Fig. 6 접합부위 예측을 위한 응력 분포

3.2 개선된 장치에 의한 용접방법

3.1 절에서는 기존의 장치에 대하여 수치해석 결과와 실험값을 바탕으로 용접의 건전성을 평가할 수 있는 기준을 마련할 수 있었다. 기존 장치의 경우 판재의 가장자리에서 용접성이 떨어지는 문제점을 발견할 수 있었는데 본 연구에서는 간단한 장치를 이용하여 가장자리에서 떨어지는 용접성을 보완하고자 한다. 일반적으로 소재에 힘을 가하여 두께를 줄이게 되면 체적을 보존하기 위하여 나머지 방향으로 팽창하려 한다. 그런데 그 방향으로 구속이 되어 있다면 압축력으로 작용하게 된다. 이 원리를 이용하여 Fig.7 과 같이 스프링을 이용하여 upsetting 힘을 가한다. 공정이 이루어지면 스프링에 압축력이 가해지고 따라서 접합면에 작용하는 힘도 증가하게 된다. 특히 공정이 진행됨에 따라 그 힘이 점차적으로 증가하므로 upsetting 힘을 효율적으로 부과할 수 있다. 스프링 장치를 사용한 경우 Fig.8 에서 알 수 있듯이 스프링 장치가 없는 경우 보다 접촉면의 수직면에 작용하는 응력이 전체적으로 증가하였음을 확인할 수 있다. 즉 upsetting 에 의한 효과가 나타났다. 용접성을 평가하기 위하여 판재의 폭 방향으로 일정한 간격으로 나누어 나누어진 전체면적에 대하여 용접이 이루어졌다고 예상되는 면적의 비를 구하여 Fig.9 에 나타내었다. 스프링 장치를 이용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 접합면이 증가하였다. 스프링 상수를 조절하여 압하력을 증가시키면 수직 응력 분포도 같이 증가하여 접합면이 증가하지만 판재의 두께가 감소하므로 허용되는 한계 내에서 압하력을 결정해야 한다.

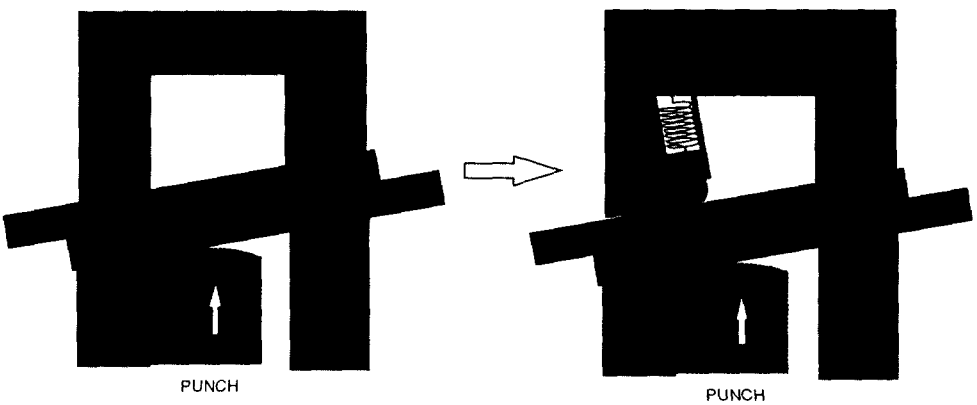
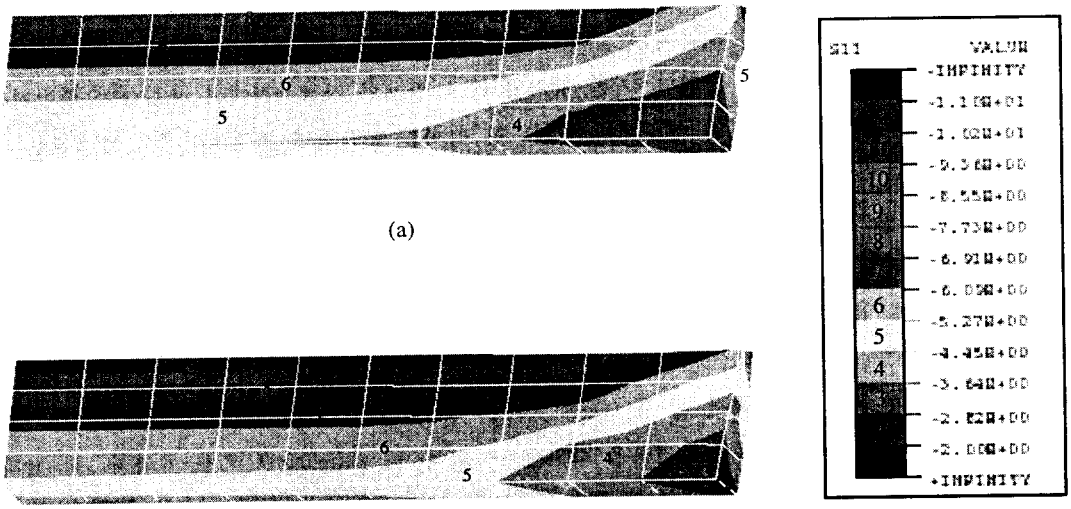


Fig.7 기존 장치와 개선된 장치



(a)

(b)

Fig.8 스프링 상수차에 따른 용접면에서의 수직 응력 분포

(a)k=50, (b)k=100

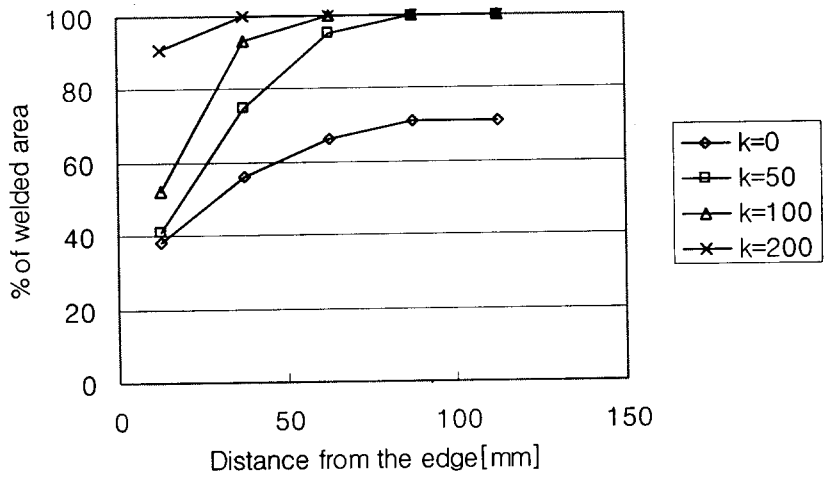


Fig.9 판재의 폭 방향 부위별 접합정도 비교

4. 결론

연연속 압연은 향후 압연기술을 이끌어갈 선진기술 가운데 하나이다. 본 연구의 내용은 연연속 압연공정에서 가장 핵심이 되는 판재 접합공정에 대한 내용으로 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 본 연구에서 제시한 해석 모델을 바탕으로 수치해석을 수행하고, 수치해석을 통한 결과와 실험을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 용접부위의 예측과 용접성 평가의 기준을 마련할 수 있었다. 둘째, 압착식에 의한 판재 접합방법의 경우 판 가장자리로 갈수록 접합력이 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 셋째, 제시된 판재 접합정도 예측 방법을 바탕으로 접합력을 향상 시킬 수 있는 방법을 제시하였고, 이를 수치해석을 통하여 검증하였다.

참고문헌

1. 주웅용, "연연속 압연기술개발 현황 및 대응전략," 포스코 기술연구소, pp. 2 - 15, 1995.
2. T. Takano, K. Matsuda, S. Moriya, N. Shibatomi, Y. Mito and K. Hayashi, " Endless hot strip rolling at Kawasaki Steel Chiba Works," Iron and Steel Engineer, pp.41-47, 1997.