

극저탄소강의 Mash Seam TB 용접성 평가에 관한 연구

한 창우* · 이 창희* · 이 명호**

*한양대학교 신소재공학부

**자동차부품연구원

A Study on Weldability Criteria of Mash Seam Tailored Blank Welds in the Ultra-low Carbon Steel Applied on Automotive Body

Changwoo Han*, Changhee Lee* and Myungho Rhee**

*Division of Materials Science and Engineering, Research Institute of Steel Processes and Applications, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seoungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Poongse-myun, Cheonan 330-912, Korea

Abstract

M/S TB(Mash Seam Tailored Blank) is a production method for blanks by welding together blanks of different material, thickness and coating, and is an attractive method for manufacturing car body because it makes parts lighter and can save the cost and time to manufacture. However, there have not been quantified criteria to evaluate the quality of TB weld. This study introduced FHR (failure height ratio) in order to assess formability or/and weldability of the M/S welds and the applicability of FHR was confirmed by actual auto body forming and FLD tests.

Furthermore, a new parameter, HN(heat number) based on the heat input of " $Q=I^2Rt$ " was proposed and assessed. It was found that the concept of HN could be utilized to evaluate the soundness of M/S welds without any destructive tests.

(Received February 15, 2002)

Key Words : Tailored blank (TB), Erichsen test; Actual test, Failure height ratio(FHR), Mash Seam welding (M/S), Heat number (HN)

1. 서 론

최근 자동차 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해 전 세계의 많은 나라들이 기술개발에 많은 투자 및 연구를 하고 있으며, 이러한 기술개발은 경량화, 저연비, 생산성 향상 등에 초점을 두고 있다. 특히 자동차 경량화 분야에서는 2개 이상의 동종 또는 이종소재를 용접하여 사용하는 TB(Tailored Blank)적용 부품의 개발이 최우선 목표가 되고 있다¹⁾.

TB란 자동차 panel의 프레스 성형에 있어서 절단한 판재를 용접하여 하나의 결합소재로 일체화시켜 프레스하는 성형 기술^{2,3)}로, TB가 가지는 장점은 필요한 구성 요소에 맞는 재료 즉, 적정 두께 및 강도를 고려한 재료를 선택하여 부품을 제작함으로써 재료비, 차체 중

량의 감소 효과를 얻을 수 있다는 것이다⁴⁾.

TB는 용접방법에 따라 mash seam(M/S) 용접과 laser 용접으로 구분될 수 있는데 각각의 장단점이 있어 적용 부품의 요구 조건에 따라 구분되어 적용된다⁵⁾. 특히, M/S용접은 laser 용접에 비해 용접 시스템에 소요되는 경비가 낮고 기존의 spot 용접을 하던 작업자들에게 익숙하여 작업상의 조작이 쉬운 장점이 있으며 운영자의 보수 유지에 어려움이 없어 국내에서 사용하기에 적절한 용접 기술로 평가되고 있다.

이러한 M/S TB 용접부의 건전성 평가를 위해 기존에는 실제 부품으로의 성형 실험을 통한 평가 방법의 경제적, 시간적 손실을 줄일 목적으로 Erichsen 실험을 통해 재현되는 용접부의 파단 형태에 따라 적정 용접 여부를 판단하였다.

그러나, 본 연구에서는 M/S 용접부의 건전성을 평가

하기 위한 방법으로 기존의 Erichsen 실험에 의한 파단 형태를 FHR(failure height ratio)로 정량화하고 이러한 정량화된 기준(FHR)의 적용성을 실제 성형 과정과 성형한계실험(FLD)을 통해 평가하였으며 용접공정 변수의 영향을 고찰하였다. 또한 Jules' s law ($Q = I^2 R t$)에 기초한 HN(heat number)를 새로운 용접성 평가 기준으로 도입하여 FHR과 HN과의 관계를 통해 HN의 적용성을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 다양한 두께의 자동차용 저탄소강판(SPRC 35강판)이며 화학적 성분을 Table 1에서 보이고 있다. 500mm×500mm 크기로 강판을 가공하여 접촉부의 틈을 최소화시킨 후 지그에 고정시킨 다음 동 두께 및 이 두께 조합에 대해 맞대기 하여 Table 2에서 나타낸 용접 조건 범위 내에서 각각의 공정 변수 조건을 변화시키면서 M/S 용접을 실시하였다.

Table 1 Chemical compositions of material

Material	Compositions (wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
SPRC35	0.003	0.004	0.43	0.034	0.009	Bal.

Table 2 Welding parameters

Welding parameters	Min.	Max.
Current (kA)	15	24
Applied force (kN)	7	14
Travel speed (m/min)	3.5	9
Overlap (mm)	Fixed (3mm)	

이러한 M/S TB 용접부의 용접성(weldability) 또는 성형성(formability)을 알아보기 위하여 Erichsen 실험을 실시하였다. Erichsen 실험은 Fig. 1과 같은 Roell Amsler 사양을 사용하여 용접 중심부와 용접 시작과 끝 부위에서 50mm 떨어진 부위를 지름이 25.4mm인 ball위에 올려놓고 20mm/min의 속도로 ball을 올려서 시편표면에 네킹이 일어날 때까지 실시하였으며 파단 형태에 따라 Fig. 2와 같이 3가지로 분류하였다. M/S 용접은 두 판재를 맞대어 용접하기 때문에 대기와의 노출에 의해 용융이 일어나지 않는 부분이 형성되며, 이러한 용접부 끝단 부위끼리 가압력에 의해 연신되어 고체 상태로 결합된 지역이 항상 존재하게 된다. 따라서, 이러한 부분이 노치 역할을 하여 균열의 원인이 되며, overlap, 가압력 및 용접전류 등의

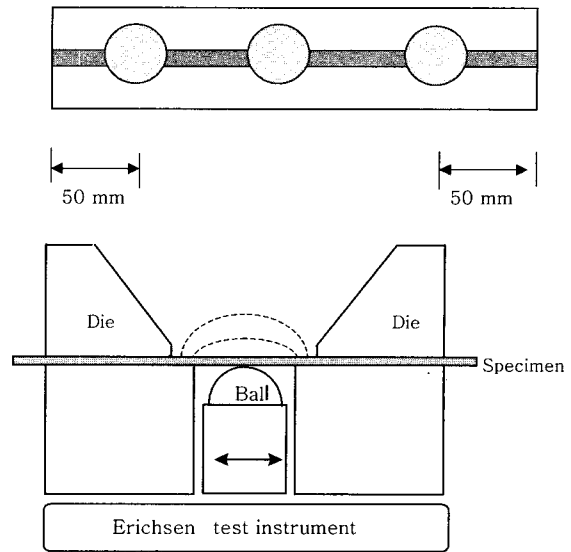


Fig. 1 Ball position and schematics of the Erichsen test

Type A		Interface separation
Type B		Crack along the HAZ (or Fusion line)
Type C		Crack across the weld

Fig. 2 Classification of the failure morphologies in the Erichsen test

용접 조건에 따라 거시적으로 type A, B, C의 파단 형태가 관찰된다. Type A는 계면을 따라 나타나는 파단이며 type B는 HAZ 파단, type C는 모재에서의 파단을 나타내며 이 중 type C의 파단 형태가 가장 바람직한 파단 형상이다. 한편, 용접부의 건전성 평가에 대한 정량적 판단 기준으로써 Erichsen 실험시 네킹이 일어났을 때의 cup 높이를 측정하여 각각의 용접 조건에 대한 평균값을 구하고 이 값과 모재 네킹 시 cup 높이와의 비로부터 Eq. 1과 같이 FHR을 정의하였다⁶⁾.

$$\text{Failure Height Ratio(FHR \%)} = \frac{\text{Necking height in weld}}{\text{Necking height in base metal}} \times 100 \quad (1)$$

FHR의 신뢰성을 확인하기 위해 실제 성형 실험과 성형 한계 실험을 수행하였다. 실제 성형 실험은 Erichsen 실험에서의 동일한 용접 조건으로 용접 된

시편을 차량용 center pillar (1.6mm -1.8mm)로 실제 성형하고 이때의 파단 형태를 관찰하였다. 실제 성형에 따른 파단 형태로부터 적정 용접에 대한 판단을 하였고, 이러한 실제 성형에 의한 용접성의 판단 결과와 Erichsen 실험에 의한 FHR 기준을 비교하였다. 한편 성형 한계 실험은 Erichsen 실험에서의 돔 장출 실험 펀치와 다이틀 이용하였으며, 성형 한계도를 구하기 위해 1.2-1.2mm 두께 조합의 용접 시편과 모재 (1.2mm)를 사용하였다. 변형률을 측정하기 위해 시편의 표면에 5mm의 원형 그리드를 예칭 하였으며, 두 모재가 겹쳐진 부위인 용접부와 주 인장 방향이 평행하고 용접선이 중앙에 위치하도록 시편을 장착하였다. FLD 실험은 시편이 변형을 일으켜 파단 될 때까지 실시하였다. 실험 후 표면의 변형된 그리드를 측정하여 장축의 주변형률과 단축의 주변형률을 구하였다. 성형 한계도를 구하기 위해 파단 주변부의 변형률을 다음과 같이 3가지로 구분하여 측정하였다.

- 안전 : 용접부에 예칭 된 그리드 중 파단이나 넥킹이 일어난 그리드에서 가장 근접해 있는 안정된 그리드
- 넥킹 : 넥킹이 발생한 부분의 그리드
- 파단 : 파단이 일어난 부분의 그리드

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Failure Height Ratio(FHR)

용접부의 성형성과 용접성을 평가하기 위해 도입된 FHR은 기존 평가 기준으로 이용되었던 Erichsen 실험에 의해 관찰되는 파단 형태를 정량화한 것으로, 본 연구에서는 이러한 FHR 기준의 적용성을 조사하였다.

동종 및 이종 두께 조합의 판재를 다양한 공정 조건으로 용접한 시편에 대해 Erichsen 실험을 통해 관찰된 파단 형태와 FHR의 관계를 Fig. 3과 4에서 보이고 있다. Fig. 3은 동 두께 조합에 대한 결과로서, Erichsen 실험에 의해 관찰된 파단 형태 중 type A는 최대 60%, type B는 약 70%이상의 FHR값을 가짐을 알 수 있다. 한편, 현장에서 적정 용접 기준으로 인식되고 있는 type C의 파단 형태는 약 90% 이상의 FHR값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 동종 이 두께조합에서의 FHR과 파단 형태의 관계를 나타내고 있다. 동종 동 두께 조합과는 달리 이 두께 조합에서는 type C의 파단 형태는 관찰되지 않았으나, type A는 약 85%이하, type B는 94%이상의 FHR값을 나타내었다. Fig. 3과 4로부터 Erichsen 실험에 의한 파단 형태로 판단되는 적정 용접에 대한

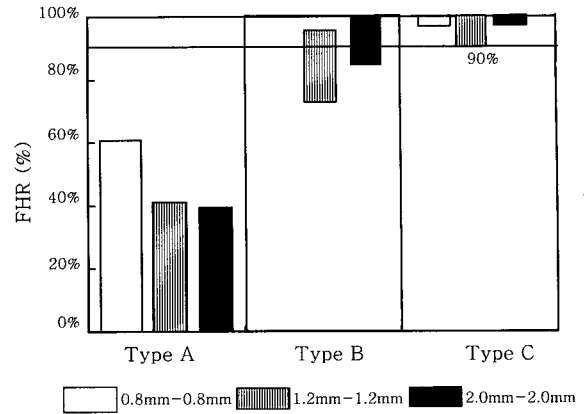


Fig. 3 Relation between failure mode and failure height ratio (Similar thickness combinations)

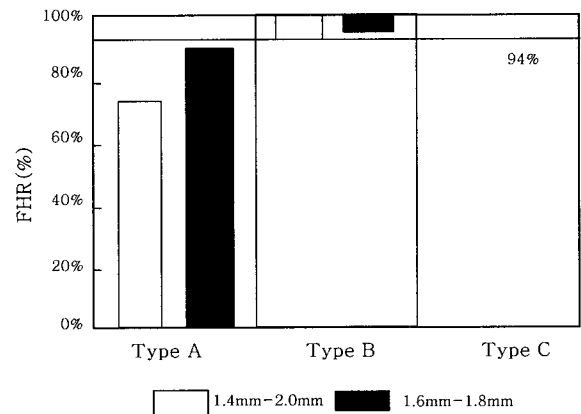


Fig. 4 Relation between failure mode and failure height ratio (Dissimilar thickness combinations)

기준이 FHR 값으로 정량화될 수 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 이러한 FHR 기준의 실제 성형 공정에서의 적용 가능성을 확인하기 위해 다양한 조건으로 용접된 1.6mm-1.8mm 이 두께 조합 시편을 이용하여 자동차의 center pillar로 실제 성형 실험을 실시하였으며, 이러한 실제 성형에 따른 파단 형태로부터 pass와 fail로 구분하고 각각의 경우에 해당하는 FHR값을 Fig. 5에 나타내었다.

실제 성형으로부터 fail 판정을 받은 interface crack과 partly slip의 파단 형태를 보이는 용접 시편에 대해 Erichsen 실험으로부터 측정된 FHR 값은 90%이하의 값을 나타내고 있다. 반면, 실제 성형에서 pass 판정을 받은 경우는 94%이상의 값을 보이고 있다. 이것은 동종 이 두께 조합에서 Erichsen 실험에 의한 파단 형태와 FHR의 관계를 나타낸 Fig. 4에서 보인 기준(94% 이상의 FHR)과 거의 일치하며 이로부


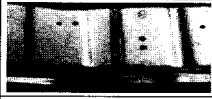

Actual Forming	State	Decision	FHR(From Erichsen test)
	Interface crack	Fail	0-65.6%
	Partly slip	Fail	59-90%
	Good state	Pass	>94%

Fig. 5 Results of actual auto body(center pillar) forming tests (SPRC 35 1.6mm-1.8mm)

터 실험실적으로 쉽게 측정할 수 있는 FHR 값이 실제 성형 과정에서의 용접성 또는 성형성에 대한 정량화된 기준으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 6과 7은 모재(1.2mm)와 동 두께(1.2mm-1.2mm) 합체박판의 용접부에 대한 성형 한계도를 보여주고 있다. M/S 용접시 동종 동 두께에서의 FLC₀ 값이 모재(30%)와 비교하여 약 5-10%정도 우수함을 나타내어 M/S 용접부의 우수한 성형성을 확인하였으며, 이러한 우수한 성형성을 보이는 용접 시편은 Erichsen 실험에 의한 FHR값이 90%정도의 값을 보였다. 따라서, 이 두께 합체 박판에 대한 실제 성형 결과와 마찬가지로 Erichsen 실험에 의한 적정 용접에 대한 FHR 기준이 타당함을 알 수 있었다.

3.2 Relationship between FHR and welding parameters

M/S 용접성에 대한 정량화된 기준인 FHR의 적용성을 실제 부품으로의 성형과 FLD 실험을 통해 알아보았다. 이러한 FHR에 대한 용접 공정 변수의 영향을

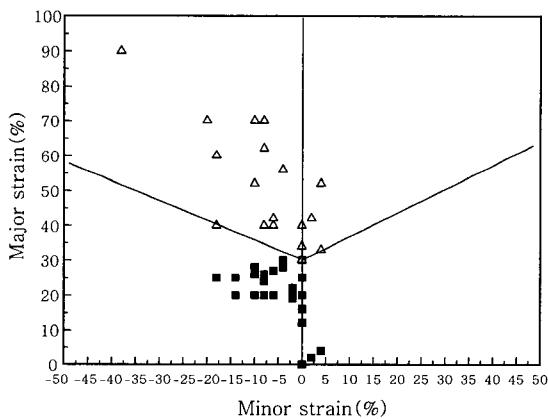


Fig. 6 Forming limit diagram of SPRC 35 (1.2mm base metal)

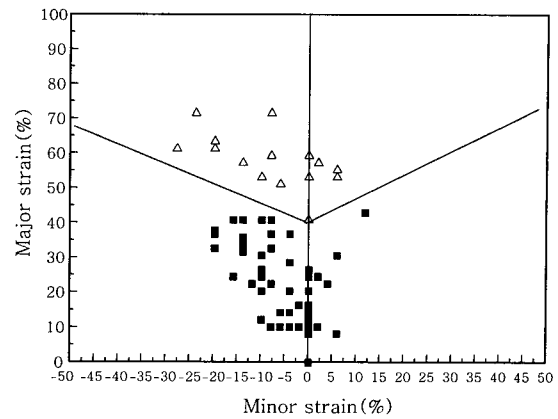
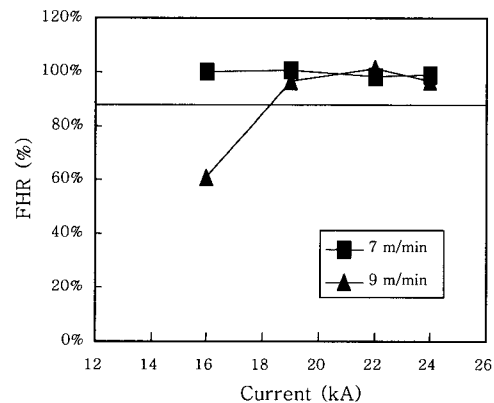


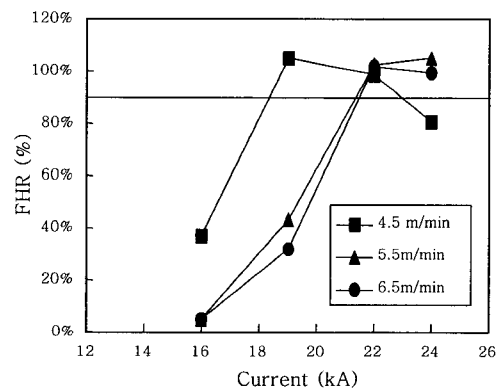
Fig. 7 Forming limit diagram of SPRC 35 weld(1.2 mm-1.2mm similar thickness steel)

Figs. 8-10에 나타내었다. 실선은 주어진 두께 조합 조건에 대해 적정 용접성을 보이는 FHR값(90%)을 나타낸다.

Fig. 8은 FHR에 대한 용접 전류의 영향을 보이는 것으로 M/S 용접의 경우 이미 형성된 용접부를 통한 전류의 흐름(shunting)이 발생하기 때문에 기존의 spot 용접의 경우보다 높은 용접전류를 사용하며, 이러



(a) SPRC 0.8mm-SPRC 0.8mm

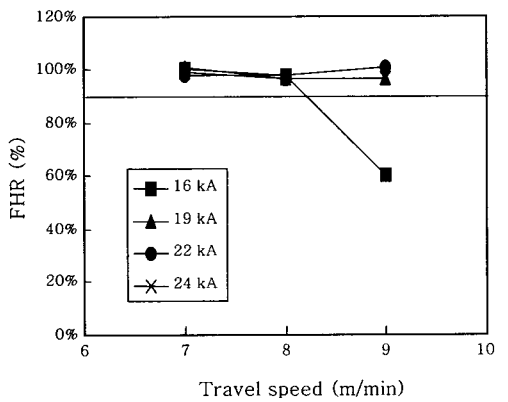


(b) SPRC 2.0mm-SPRC 2.0mm

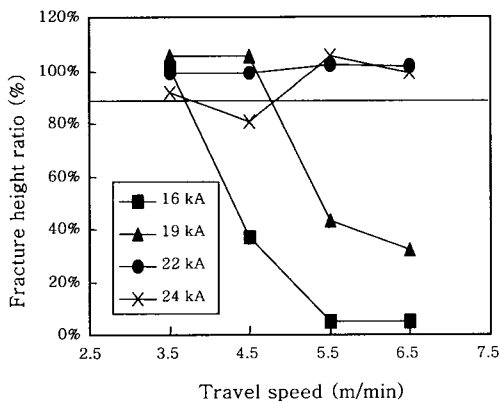
Fig. 8 Effect of current on failure height ratio

한 전류는 저항열에 가장 큰 영향을 미치는 변수이다. Figure에서 알 수 있듯이 전류가 증가하게 되면 FHR 값이 증가하는 경향을 보이는데 그 이유는 전류 증가에 따른 용접부의 발열량 증가로 용입량이 증가하기 되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Fig. 8(a)와 (b)를 비교하면, 두께에 따른 용접 전류의 영향에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 8(b)에서와 같이 두꺼운 판재의 용접에 대해 적정 용접성을 확보하기 위해서는 더욱 큰 입열 조건이 주어져야 함을 알 수 있다. 그러나, 이러한 경우 과도한 입열 조건에서는 용접성의 저하가 관찰되었으며, 이는 전극과 판재 사이의 arcing에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 9는 용접속도와 FHR과의 관계를 나타낸 것으로 용접속도 증가에 따라 FHR값이 점차 감소함을 알 수가 있는데 22kA 이상의 고 전류에서는 용접속도에 따른 변화에도 FHR값은 큰 영향이 없음을 알 수가 있었다. Fig. 10은 용접 시 사용된 가압력과 FHR과의 관계를 나타낸 것이다. 전극에 의한 가압력은 M/S 용접부의 접촉 면적 증가에 따른 전류 밀도의 감소를 야기시키며 용접부의 발열량을 감소시킨다. 특히 가압력 증가에 따라 접촉저항의 감소에 의한 입열량의 저하가 발



(a) SPRC 0.8mm-SPRC 0.8mm



(b) SPRC 2.0mm-SPRC 2.0mm

Fig. 9 Effect of travel speed on failure height ratio

생한다. 따라서, Fig. 10에서 18kA의 고전류 조건을 제외하고, 10kN이상의 가압력 조건에서의 용접성 저하는 이러한 이유에 기인하는 것으로 보인다.

따라서 최적의 용접성을 확보하기 위해서는 가압력, 용접속도, 전류 등 각각의 용접조건 뿐만 아니라, 지나친 입열에서 기인하는 arcing 등을 고려해야만 한다.

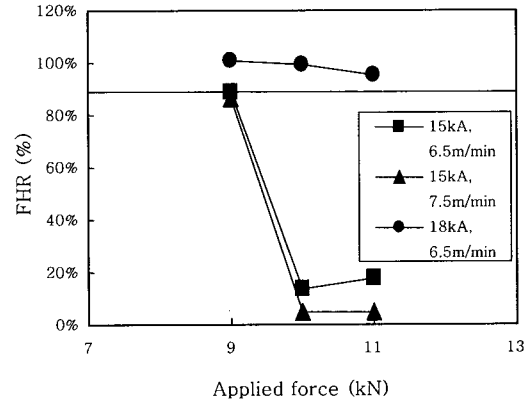


Fig. 10 Effect of applied force on failure height ratio (SPRC 1.2mm-SPRC 1.2mm)

3.3 The concept of heat number

지금까지 실제 성형 및 성형 한계 실험을 통해 M/S 용접성에 대한 기준으로서의 FHR의 적용성과 이러한 FHR에 대한 공정 변수의 영향에 대해 고찰하였다. 그러나, 실제 용접 후 Erichsen 실험과 같은 용접성 평가에 대한 실험 없이 주어진 용접 공정 변수만으로 용접특성을 예측할 수 있다면, 용접 조건 설정 등에 있어 시간적, 경제적 효율이 향상될 것이다. 이를 위해 일반적인 용접성에 대한 판단 기준인 입열량의 개념에 기초한 HN을 도입하였다.

일반적으로 M/S용접과 같은 저항 용접은 발열 손실을 이용하는 기술이며, 이때의 열량(Q)는 Joule's law, $Q=I^2Rt$ 로 표현된다^{7,8)}. 이때의 저항(R)은 용접 시 가압력에 관계되어진 함수이고 가압력이 클수록 저항은 감소하는 것으로 알려져 있다. 그리고 용접시간(t)은 용접속도와 관계를 가지며 용접 속도에 반비례한다. 그러므로 입열량(Q)은 전류가 높을수록, 가압력 및 속도가 낮을수록 증가한다는 사실을 이용하여 다음과 같이 HN을 표현할 수 있다.

$$Heat\ number(HN) = \frac{I^2}{AF \times v} \quad (2)$$

여기서 I와 v는 각각 용접 전류와 용접 속도이며 AF는 가압력을 의미한다.

SPRC 35강재의 동종 동 두께 조합에 대하여 HN과 FHR과의 관계를 Fig. 11과 12에 나타내었으며, 동 두께 조합에 대한 적정 용접성 기준인 90% FHR값을 표시하였다. 동종두께 SPRC 0.8mm의 경우 적정용접 조건을 만족하는 즉, 90%이상의 FHR값을 보이는 경우 HN은 4이상의 값에 해당하며, 동종두께 1.2mm는 6이상에 해당한다. 이로부터 HN이 용접성 평가에 대한 기준으로서의 적용이 가능할 뿐만 아니라, FHR에 비해 보다 세부적인 기준이 될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 이 두께 조합에 대한 실제 성형 공정에서의 파단 형태와 FHR 및 HN 과의 관계를 보이고 있다. 실제 성형에 의해 관찰된 파단 형태에 따라 HN가 일정한 관계로 대응함을 알 수 있으며, 우수한 용접성을 보이는 경우에서의 HN는 7이상의 값을 보임을 알 수 있다. 이러한 7 이상의 HN값은 94% 이상의 FHR에 해당하며, 이로부터, 실제 성형에 있어서의 성형성 평가에 대한 기준으로서 FHR 기준을 대체할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

1) 기존의 용접성 평가 방법인 파단 형태에 기초한 기준에 대한 정량적인 기준으로서의 FHR을 제안하였

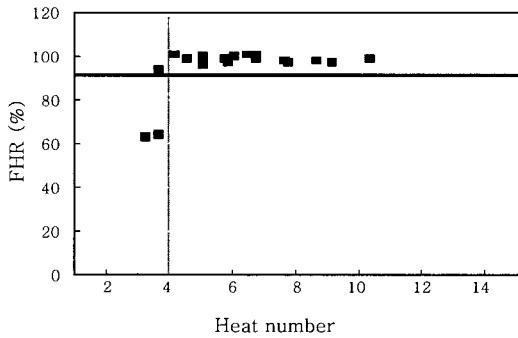


Fig. 11 Relationship between heat number and failure height ratio(SPRC 0.8mm-SPRC 0.8mm)

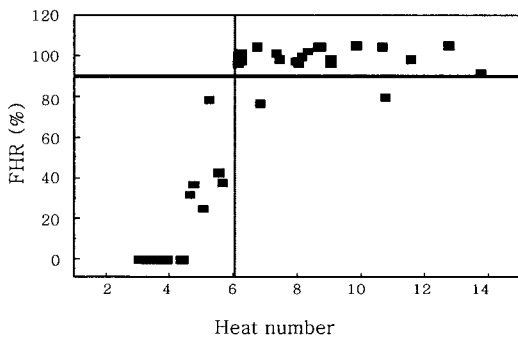


Fig. 12 Relationship between heat number and failure height ratio (SPRC1.2mm-SPRC 1.2mm)

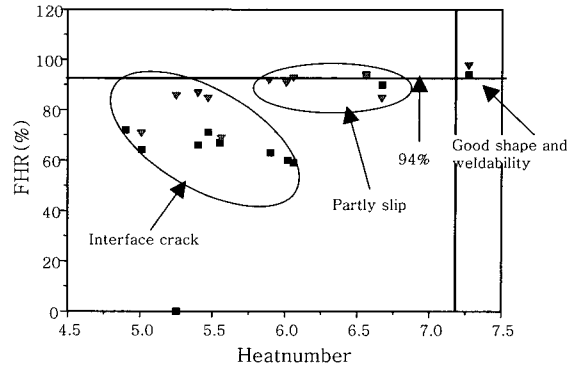


Fig. 13 Relationship between heat number, failure height ratio and failure mode for actual forming (SPRC35 1.4mm-2.0mm : front side member, SPRC35 1.6mm-1.8mm : center pillar)

으며, 실제 부품으로의 성형과 FLD실험을 통해 FHR 기준이 M/S 용접성에 대한 평가 기준으로서의 적용이 가능함을 확인하였다.

2) 용접성에 대한 공정 변수의 영향을 FHR과 용접 변수의 관계로부터 고찰하였다.

3) 용접성 평가를 위해 입열량에 기초한 HN(heat number)의 새로운 개념을 제안하였으며, FHR과 실제 성형 실험과의 비교를 통해 HN를 이용함으로써, 실험 없이 용접 변수만으로 용접성 평가가 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. W. Prange : 1989 SAE International Congress & Exposition, Aug., 1989, Detroit, Michigan, USA, 751-762
2. B. G. Chung, G. M. Ko, K. H. Chung and C. H. Lee : J. Kor. Soc. Laser Processing, 2-1 (1999), 61-67 (in Korean)
3. M. F. Shi, K. M. Pickett : 1993 SAE International Congress & Exposition, Feb., 1993, Detroit, Michigan, USA, 27-34
4. A. P. Lee, E. Feltham and J. V. Deventer : 1996 SAE International Congress & Exposition, Aug., 1996, Detroit, Michigan, USA, 91-102
5. E. J. Funk and M. L. Begeman : Welding J., (1956), 265-274
6. B. G. Chung and C. H. Lee : Mater. Sci. & Eng., 272 (1999), 357-362
7. R. W. Messler, Jr. : Principles of Welding-Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy, JOHN WILEY & SONS Inc., New York, 1999
8. R. L. O'Brien : Welding Handbook Vol. 2, 8th edition, American Welding Society, 1991