

590MPa급 고강도강 플래시버트 용접이음부의 기계적특성

정보영* · 우인수* · 김정길* · 이종봉*

*POSCO 기술연구소

Mechanical Properties of the Flash Butt Welded Joint of 590MPa High Strength Steel.

Boyoung Jeong*, In-Su Woo*, Jeong-Kil Kim* and Jong-Bong Lee*

*POSCO Technical Research Lab., Pohang 790-785, Korea

Abstract

Flash butt weldability of 590MPa dual phase steel is carried out under micro metallographical examination and macro mechanical property tests. The objective of present study is to investigate the cause that brings on bond line fracture, and is to improve mechanical properties of the flash butt welded joint. The joint of flash butt welding has a superior tensile property, but has bad formability due to oxide formed at bond interface. The HAZ softening in the weld joint does not show. It was found that mechanical properties were increased with optimizing welding parameters and making application of oil dripping and post-weld heat treatment.

*Corresponding author : jbyoung@posco.com

(Received December 14, 2006)

Key Words : Flash butt welding, DP steel, Tensile strength, Erichsen test

1. 서 론

플래시버트 용접은 저항용접법의 하나로서, 대면적의 용접단면적을 가지는 피용접재에 대해, 단시간에 신뢰성 높은 접합부 특성을 확보할 수 있는 고능률의 용접 프로세스로 널리 이용되어 왔다¹⁻³⁾. 특히, 제철소에서는 열연코일을 연속적으로 후공정에 투입하기 위한 코일간의 연결방법으로 플래시버트 용접이 주로 사용되고 있다. 따라서, 제철소 일관공정에서의 생산성 향상을 위해 생산 강종에 대한 플래시버트 용접성 확보는 필수불가결한 요소이다.

최근 자동차의 경량화 추세에 따라 고강도 및 성형성이 우수한 자동차용 강재가 주목을 받고 있다. 그 대표적인 강종으로서 DP(Dual Phase)강은 마르텐사이트와 페라이트로 된 기지조직을 가지며, 우수한 강도 및 성형성을 확보할 수 있는 강종이다. 이러한 DP강에 플래시버트 용접을 적용했을 경우, 용접부는 HAZ연화로 인한 용접부 강도가 저하되고, 특히 접합면에 평행한

방향으로 소성변형대가 존재하며, 각 영역들은 조직학적으로 상이한 특성을 가지게 되므로 균일한 용접부 특성을 확보하기 어려운 문제점이 있다⁴⁻⁹⁾. 또한, 일반적으로 저합금강의 플래시버트 용접성은 양호하지만, 고합금강에서는 합금원소의 영향으로 건전한 용접부를 확보하기 어려운 경향이 있다.

따라서, 본 연구에서는 DP강의 플래시버트 용접성 저하원인을 규명하고, 용접부의 기계적 특성을 확보하기 위한 개선을 시도하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

Table 1에 본 연구에 사용된 590MPa급 DP강의 화학조성을 나타낸다. 또한, Fig. 1에 실험재료의 광학현미경 미세조직을 나타낸다. Fig. 1로부터 실험에 사용된 강재는 페라이트 기지에 저탄소 마르텐사이트 콜로니가 혼합된 미세조직을 나타내고 있는 것을 알 수

Table 1 Chemical composition of 590DP steel examined

	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe	Ceq _{WEC}
590DP	0.1	0.15	1.6	<0.02	<0.003	0.05	Bal.	0.36

Table 2 Welding conditions for flash butt welding of 590DP steel

Int. stroke (mm)	Fin.stroke (mm)	Upset Lenth (mm)	2 nd Volt. (V)	Flash time (sec)	Upset Press. (Mpa)	Heat Power (kW)	Heat time (s)
15.0	15.0	3.0	8.9	9.0	700	-	-

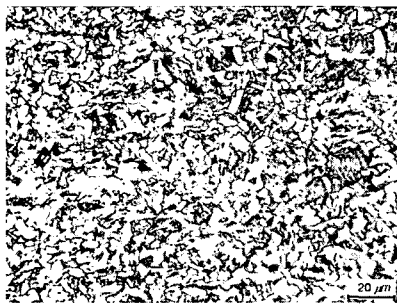


Fig. 1 Optical micrograph of 590DP steel examined

있다. 플래시버트 용접에는 선·후행재 모두 두께 3.0mm, 폭1,200mm의 열연강판을 이용하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용한 플래시버트 용접조건을 Table 2 및 Table 3에 나타낸다. 또한, 플래시버트 용접과정에 대한 모식도를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2로부터, 플래시버트 용접과정을 다음과 같이 설명할 수 있다. 플래시버트 용접기는 고정대와 이동대로 구분되며, 각각 전극 역할을 하는 고정용 클램프가 선·후행 코일의 끝단부 및 선단부를 고정하게 된다(a). 다음으로, 이동대 측이 고정대로 접근하게 되고, 임계거리 이상 접근하면 전류가 공급되며(b), 피용접재(판재)가 접촉하는 순간 판재

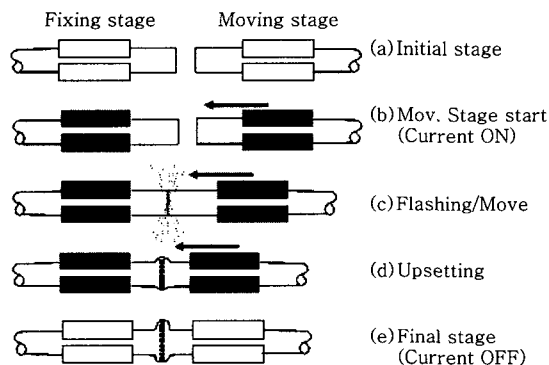


Fig. 2 Schematic illustration of flash butt welding process

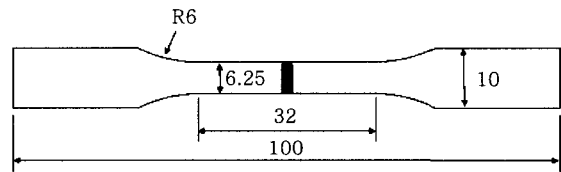


Fig. 3 Dimension of specimen for tensile test

단면부 전체에서 저항열에 의해 발생하는 플래시가 비산한다(c). 그리고, 일정 시간 동안의 플래시 발생과정이 끝남과 동시에 전류는 차단되고, 용융된 판재 단면부를 업세트압력에 의해 기계적으로 압착시켜, 용융금속은 접합면 밖으로 배출하게 되는 과정에 의해 건전한 접합부를 얻게 된다(d, e). 이러한 일련의 용접과정을 거치는 용접방법을 플래시버트 용접이라 한다.

접합부의 미세조직을 관찰하기 위해 용접시험편을 습식연마 후, 3% 나이탈 부식액을 이용하여 미세조직을 현출하고, 용접부 단면조직을 관찰하였다. 용접부의 경도분포는 마이크로비커스 경도기를 이용하여 측정하였으며, 측정하중은 4.9N로 하였다. 또한, 용접이음부의 기계적 특성을 파악하기 위해 인장시험 및 에릭슨시험을 실시하였다. 인장시험은 KS B0833에 의거 진행하였으며 시험편의 형상을 Fig. 3에 나타낸다. 이 때, cross-head의 이동속도는 5mm/min로 하였다. 에릭슨시험은 볼의 직경 20mm, 편치 상승속도는 0.5mm/s로 실시하였다. 에릭슨시험 후, 파단시험편의 파단면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 미세조직 및 경도분포

Table 2의 용접조건으로 용접을 실시한 플래시버트 용접부의 단면조직을 Fig. 1에 나타낸다. 용접조건은 동일 두께에 대해 일반적으로 사용되는 조건을 그대로 적용하였다. 접합계면(A) 부근에는 백색으로 보이는 조직이 형성되고 있는 것을 알 수 있다. HAZ 고온영역

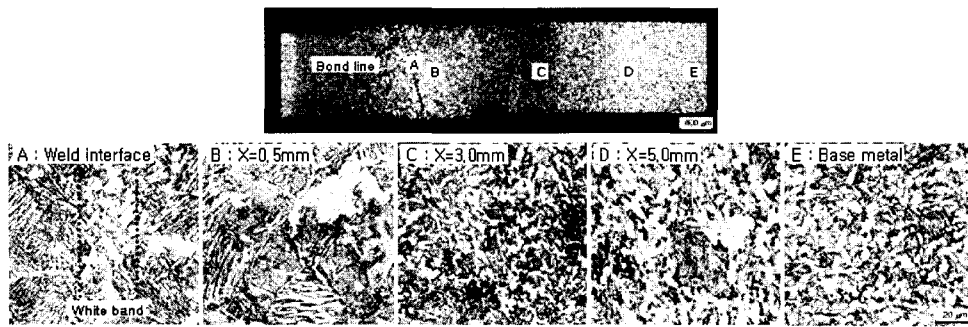


Fig. 4 Optical micrographs of the flash butt welded layer of 590DP steel(As welded). X indicates distance from bond line

(B)에서는 마르텐사이트 혹은 베이나이트가 생성되고 있다. 접합계면으로부터 3.0mm 부근(C)의 조직은 미세한 페라이트 및 퍼얼라이트로 구성된 것으로 판단되며, HAZ 저온영역(D)에서는 용접입열에 의해 형성된 조대한 페라이트와 템퍼링된 마르텐사이트로 판단되는 조직이 혼재하고 있다.

일반적으로, 접합계면에 생성되는 백색의 조직은 용접과정중 탈탄에 의해 생성되는 것으로 보고되고 있으며, 그 생성기구는 주로 다음과 같이 설명되고 있다^{1,2,10)}. 강은 용접에 가까운 고온에서 고상과 액상이 공존하는 구역이 있다. 이 중 고상의 탄소량은 적고, 액상의 탄소량이 많게 된다. 플래시용접 과정 중, 접합면에 플래싱에 의해 액상 및 고·액 공존상이 형성된 후, 업세트 압력을 받으면 액상이 접합면 외부로 배출되게 되고, 고상만 남게 되므로 주변조직과의 상대적인 탄소함량 차이로 백색층을 나타내게 된다. 따라서, 본 연구에서 사용된 DP강의 접합계면에 생성된 백색층도 탈탄에 의해 형성된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 5에 용접부의 경도분포를 측정한 결과를 나타낸다. 접합계면을 포함한 HAZ 고온역에서는 모재경도

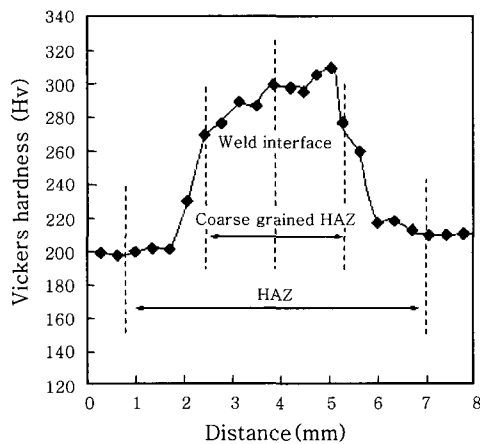


Fig. 5 Hardness distribution of the flash butt welded layer of 590DP steel(As welded)

(Hv200)보다 높은 경화역이 형성되는 것을 알 수 있다. 이것은 이 영역에 형성된 마르텐사이트 및 베이나이트 변태의 영향으로 판단되며, 일반적인 용접부에서 나타나는 HAZ연화는 관찰되지 않았다.

3.2 용접이음부의 기계적특성

플래시버트 용접이음부의 인장특성을 Fig. 6에 나타낸다. 코일의 폭방향으로 중앙부 및 좌·우측(코일 양단에서 내측 50mm 부분) 부분의 인장특성을 평가하였다. 각 부위에서는 거의 동등한 수준의 인장특성이 나타나고 있고, 인장강도는 모재의 94~97%에 달하고 있다. 한편, 연신율은 모재의 절반수준으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

Table 3에 용접부에 대한 에릭슨시험 결과를 나타낸다. 에릭슨값은 용접부 중앙에서 가장 양호한 값을 나타내고 있고, 우측, 좌측의 순으로 에릭슨값이 저하하고 있음을 알 수 있다. 또한, 코일 중앙부에서는 열영향부에서 파단이 발생하였으나, 폭방향 좌·우측 부위에서는 에릭슨시험 과정중 접합계면에서 파단이 발생하는 것이 관찰된다.

따라서, 인장시험에서 모재 파단이 발생하는 인장강

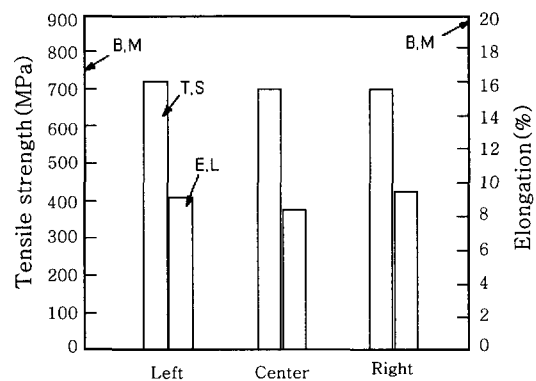


Fig. 6 Tensile properties of the flash butt welded joint of 590DP steel

Table 3 Results of erichsen test for the flash butt welded joint of 590DP steel

	Erichsen value(mm)	Erichsen value(mm)	Crack path
Left	3.64	20.8	Bond line
Center	10.88	68.8	HAZ
Right	6.07	35.9	Bond line

도를 가진 용접부임에도 불구하고, 용접부의 성형성은 크게 저하하는 것으로 판단할 수 있다.

3.3 파면분석

Fig. 7에 에릭슨시험에서 접합계면 파단이 일어난 시험편의 파단면을 관찰한 결과를 나타낸다. 전반적으로 파단면은 편평한 형태를 나타내고 있으며, 덩플이 관찰되는 연성파면(A)과 함께 일부 취성파면(B)이 혼재하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8에는 Fig. 7의 파단면에서의 C부분을 상세히 관찰한 결과를 나타낸다. 중앙부에 미접합부(Cold weld zone)로 판단되는 영역이 나타나고 있고, 덩플로 판단되지만 그 내부에 산화물이 관찰되는 영역이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. EDX 성분분석 결과, 미접합부 및 덩플내부에서 관찰되는 산화물은 Mn-Si-Al계의 복합산화물이었다. 따라서, Fig. 7 및 Fig. 8의 결과를 바탕으로, 접합계면에서 파단이 일어난 Fig. 7의 파단면은 각 영역별 생성기구에 따라 Fig. 9과 같이 모식적으로 설명할 수 있다. 파단면은 연성파면을 나타내는 양호한 접합부(Bonded zone), 연성파면을 나타내지만 일부 덩플 내부에 산화물이 혼재하는 영역(Flat spot zone¹¹⁾) 그리고, 가압시 용융금속이 미압착되어 접합계면 표면이 산화되는

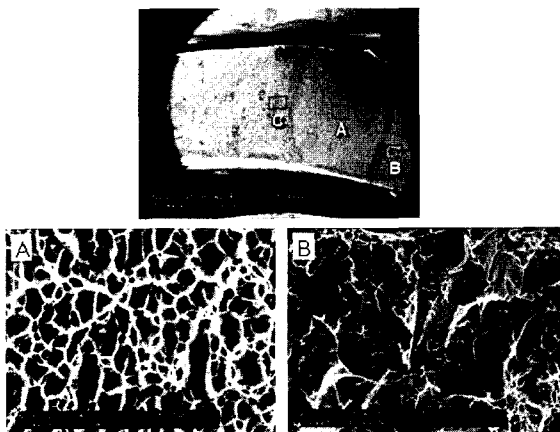


Fig. 7 Fractographs of the fractured surface of the flash butt welded joint of 590DP steel after erichsen test

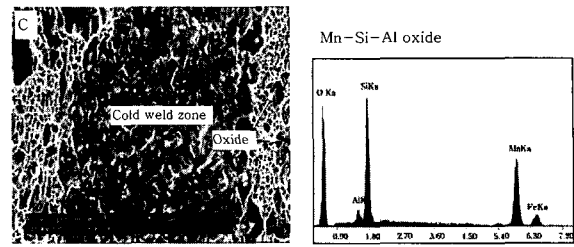


Fig. 8 EDX Analysis of oxide at flat spot in fractured surface of 590DP steel

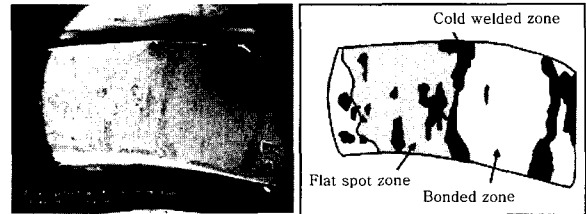


Fig. 9 Schematic illustration of the fractured surface of 590DP steel

영역(Cold weld zone)으로 구분할 수 있다. 따라서, 산화물 혼재영역(Flat spot zone) 및 미압착부(Cold weld zone)는 불완전한 접합을 나타내는 영역으로서 이 영역에 응력이 집중될 경우, 쉽게 균열이 발생하여 접합계면 파단을 일으킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 에릭슨시험에서 접합계면 파단이 일어난 이유는, 접합계면에서 결함으로 존재하고 있는 산화물 및 미접합부에 응력이 집중하여 균열이 발생, 전파되기 때문으로 생각된다.

3.4 산화물 생성기구

Fig. 10에는 용접파라메타가 부적절한 경우에 산화물들이 생성되는 과정을 모식적으로 나타내었다. Fig. 10으로부터, 용접시 산화물이 생성하는 원인은 다음과 같이 생각된다. 용접부 접촉면에 전류가 집중되어 용융, 비산하는 플래싱과정에서, 용접부 접촉면에 집중되는 전류가 과도하게 높을 경우(특히, 2차전압이 높을 경우) 플래시가 거칠게 되고, 비산량도 커진다. 비산량이 클 경우, 접합계면에서는 다음 플래시가 일어나기 전까지 대기하는 시간이 길어져 용융금속이 쉽게 산화, 냉각되는 부분이 발생한다(a-c). 이후, 용접면을 기계적으로 압착시키는 업세트과정에서, 용융금속과 함께 산화물들을 접합계면 밖으로 배출시키지 못할 경우 산화물 혼재영역(Flat spot zone)이 형성된다. 그리고, 비산량이 큰 부분에서는 압착력이 냉각된 용융금속에 미치지 못하고 미압착부(Cold weld zone)로 남게 된다(d).

일반적으로 접합부에 생성하는 산화물들은 용접시 용

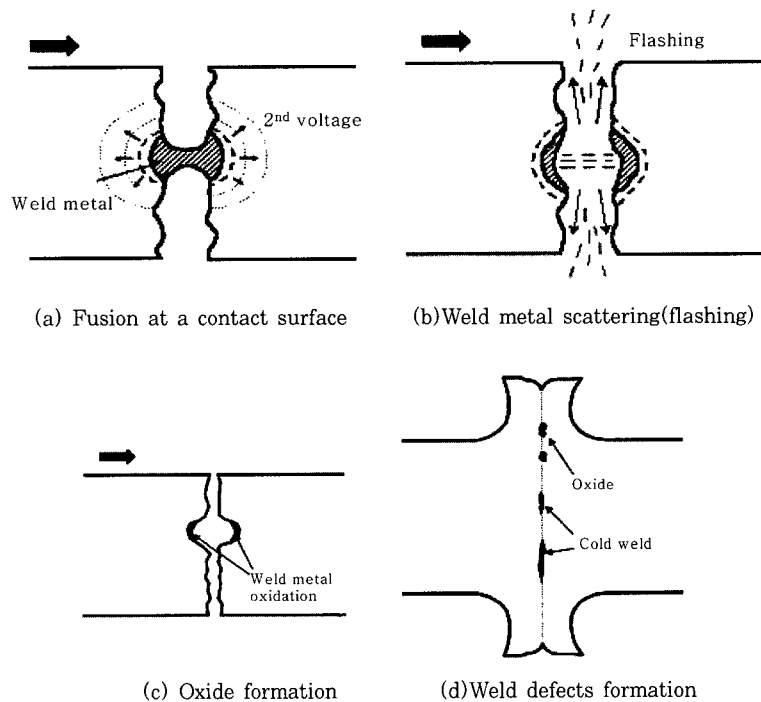


Fig. 10 Schematic illustration of the mechanism of oxide formation during flash butt welding

용융속중의 친산화성 원소가 대기중의 산소와 결합하여 생성된다. 특히, Mn, Si, Al 등은 산소와의 친화력이 커서 용접과정 중에 쉽게 산화하는 특성을 나타내게 된다. 따라서, 용접과정 중에 대기와의 접촉으로 생성된 이러한 산화물들은 플래싱 및 업세트 과정에서 용융금속과 함께 접합계면 밖으로 배출되어야 하나, 부적절한 용접파라메타에 의해 밖으로 배출되지 못하고 접합계면에 잔존하여 용접결함으로 남게 되는 것으로 판단된다.

3.5 용접이음부 특성 개선

DP강 플래시버트 용접부의 특성확보를 위해 용접조건 최적화를 통한 용접이음부 특성개선을 시도하였다. Table 4에 개선전(#1)·후(#2)의 용접조건을 나타낸다. 플래시 비산을 부드럽게 하기 위해 2차전압을 감소시키고, 산화물 배출을 위해 업세트길이를 증가시켰다. 또한, 2차전압 감소에 따른 입열량 저하를 보상하기 위해 플래시시간을 증가시켰다. 그리고, 용융금속의 산화

를 억제하기 위하여, 피용접재에 오일을 도포하여 용접을 실시하였다. 도포한 오일은 용접과정중 용접열에 의해 연소하며, 비산하는 플래시와 함께 용접단면 상·하부로 배출되므로 용접단면에 생성되는 용융금속과 대기와의 접촉을 억제하는 효과가 있다¹²⁾. 마지막으로 용접 후열처리를 적용하여 용접부 경화도를 저감하고자 하였다. 즉, 먼저 용접파라메타 최적화를 통한 산화물 생성을 최소화하고, 다음으로 오일도포를 통해 비산화성 분위기를 조성하여 접합계면에서 산화물의 생성이 최대한 억제되도록 용접한 후, 후열처리를 통해 용접부 연성을 증가시키도록 용접조건을 설정하였다.

Fig. 11은 개선후(#2) 조건에 의한 접합부 단면의 미세조직 분포를 나타낸 것이다. 후열처리 실시의 영향으로, HAZ 고온역(A, B)에는 주로 템퍼링된 베이나이트 및 마르텐사이트를 나타내고, HAZ 저온역(C)에는 페라이트와 탄화물로 이루어진 조직이 나타나는 것으로 판단된다.

Table 4 Welding conditions for flash butt welding of 590DP steel

	Int. stroke (mm)	Fin. stroke (mm)	Upset Lenth (mm)	2 nd Volt. (V)	Flash time (sec)	Upset Press. (Mpa)	Heat Power (kW)	Heat time (s)	Remarks
#1	15.0	15.0	3.0	8.9	9.0	700	-	-	-
#2	15.0	15.0	3.6	6.8	15.0	700	500	9	Oil

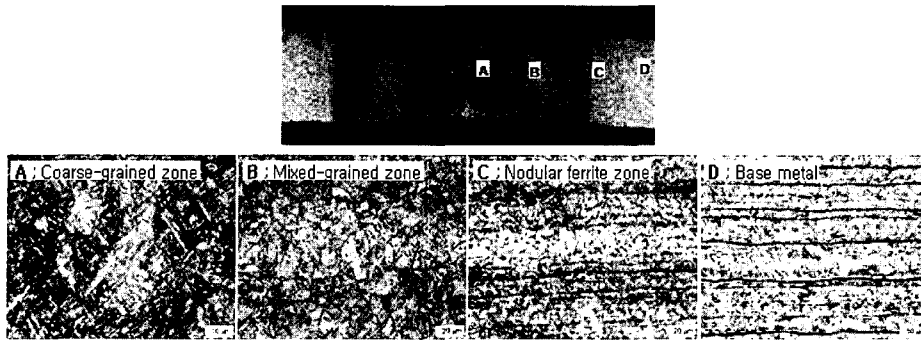


Fig. 11 Optical micrographs of the flash butt welded layer of 590DP steel after post-weld heat treatment

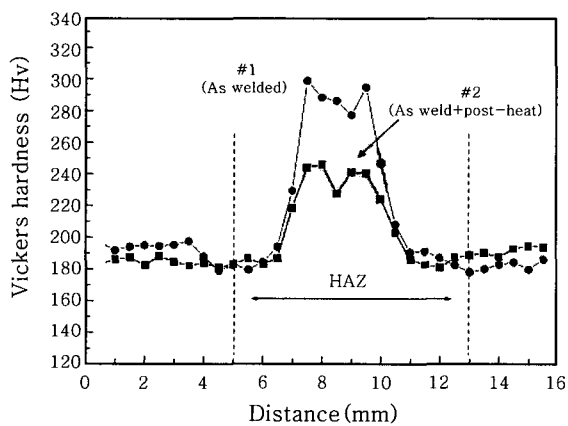


Fig. 12 Hardness distribution of the flash butt welded layer of 590DP steel

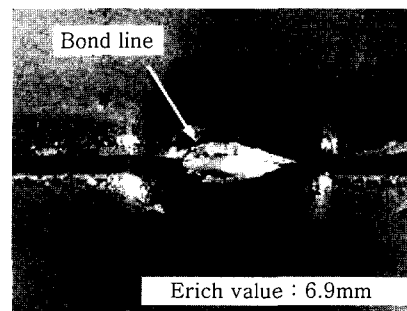
Fig. 12에 용접부의 경도분포를 측정한 결과를 나타낸다. 개선전·후(#1, #2)의 용접조건에 의한 접합부 중앙의 HAZ경화역의 경도는 모재 수준까지 확보할 수는 없지만, 개선후(#2) 조건에서는 용접열처리의 영향으로 경도가 Hv240까지 저감하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 5에 개선전·후(#1, #2)의 용접부에 대해 에릭슨시험을 실시한 결과를, Fig. 13에는 에릭슨시험부의 외관사진을 나타낸다. 개선전(#1)에 비해 개선후(#2)의 접합부 에릭슨값은 크게 상승하며, 접합계면에서 파단은 발생하지 않고 모재에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 플래시버트 용접이음부의 특성이 모재와 동등 수준 이상까지 증가하는 것으로 판단된다.

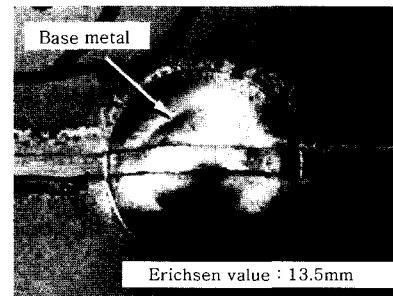
따라서, 용접공정변수 최적화와 오일 도포를 이용하

Table 5 Results of erichsen test for flash butt welded joint of 590DP steel

	Erichsen value(mm)		
	Left	Center	Right
#1	3.64	6.88	4.39
#2	13.49	9.52	11.25



(a) Bond line fracture(#1)



(b) Base metal fracture(#2)

Fig. 13 Configurations of the flash butt welded joint of 590DP steel after erichsen test

여 접합계면에서의 산화물 생성을 억제하고, 용접후열처리를 이용한 용접부 경화도 저감을 통해 플래시버트 용접이음부의 기계적특성을 모재수준 이상으로 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 DP강에 대한 플래시버트 용접부의 특성평가에 의해, 용접성 저하원인을 규명하고, 각종 용접공정변수의 최적화를 통해 용접이음부 특성의 개선을 실시하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 플래시버트 용접부의 HAZ 고온역에서 마르텐사이트 및 베이나이트가 생성되고, HAZ 저온역에서는 조대한 페라이트와 템퍼링된 마르텐사이트로 판단되는 조

직이 혼재하고 있다. 접합계면에는 백색의 페라이트가 생성되었다.

2) 모재 파단이 발생하는 인장강도를 가진 용접부에서도 에릭슨시험시 접합계면 파단에 의해 용접부의 성형성은 크게 저하하였다.

3) 용접과정중 용융금속의 산화에 의해 Mn-Si-Al계의 복합산화물들이 접합계면에 생성되고, 에릭슨시험시 접합계면 파단을 일으키는 용접결함으로 작용하였다.

4) 용접공정변수의 최적화, 오일도포 및 용접후열처리 실시에 의해 모재와 동등 수준 이상의 플래시버트 용접이음부의 기계적특성을 확보하였다.

참 고 문 헌

1. K. Ando, S. Nakata and T. Sugimoto : Study on the Flash Welding Phenomena of Steels(2nd Report)-Observation by High Speed Motion Pictures-, Journal of JWS, **40-1** (1971), 35-53 (in Japanese)
2. K. Ando, S. Nakata and T. Sugimoto : Study on the Flash Welding Phenomena of Steels(3rd Report)-On the Upsetting Process-, Journal of JWS, **40-2** (1971), 137-151 (in Japanese)
3. K. Ando, S. Nakata and Y. Nishida : Dispersion Mechanism of Oxide Inclusion at the Interface of Specimens in Upset Butt Welding, Journal of JWS, **40-11** (1971), 1140-1148 (in Japanese)
4. K. Kunishige, N. Yamaguchi, T. Taka and N. Nagao : SAE Tech. Pap. 830632. PA, USA (1983)
5. B. K. Jha, N. S. Mishra and V. Ramaswamy : Steel India, **6**(1983), No.2, 114
6. M. Mizui, S. Soneda, T. Sekine, T. Herat, M. Ejima and T. Sato : Nippon Steel Tech. Rep., (June 1984), No.23, 19
7. B. K. Jha, Ram Avtar, V.S Dwivedi and V. Ramaswamy : Proc. Oof Int. Conf. Welding Tech. in Developing Contries - Present Status and Future Needs, Univ. of Roorkee, India (1988), III-199
8. P.K. Ghosh, P.C. Gupta, Ram Avtar and B.K. Jha : Proc. Oof Int. Conf. Welding Tech. in Developing Contries - Present Status and Future Needs, Univ. of Roorkee, India (1988), II-53
9. P.C. Gupta and P.K. Ghosh : Weldability of Dual Phase Steel Produced by Steel Authority of India Ltd., Project Report, Welding Research Lab., Dept. of Mech. & Industr. Eng., Univ. of Roorkee, India (1988)
10. J. Za'k : The Origin of Light Area in Upset Welds of Rolled Carbon Steel, Welding Journal, **Vol.51** (1972), No.3, 272s-279s
11. J.C. Barrett : Flash Welding of Alloy Steels - Physical and Metallurgical Characteristics, Welding Journal, **Vol.24** (1945), No.1, 25s-45s
12. JS P 1987-275581