780 MPa급 TRIP강의 저항 점용접부 강도 및 파단에 미치는 Paint Baking의 영향

손종우* · 남대근** · 김동철*** · 박영도*,†

*동의대학교 신소재공학과

**한국생산기술연구원 동남권 기술지원본부

***한국생산기술연구원 용접 접합연구부

Effect of Paint Baking on the Strength and Failure of Spot Welds for 780 TRIP Steels

Jong-Woo Son*, Dae-Geun Nam**, Dong-Cheol Kim*** and Yeong-Do Park*,†

*Dept. of Advanced Material Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

**Dongnam Technology Service Division, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 618-230, Korea

***Advanced Welding & Joining R&D Division, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

†Corresponding author : ypark@deu.ac.kr

(Received November 30, 2009 ; Revised December 28, 2009 ; Accepted January 12, 2010)

Abstract

Conventional fracture test of resistance spot weld had been performed without consideration of paint baking process in automobile manufacturing line. This study was aim to investigate the effect of paint baking on fracture mode and load carrying capacity in fracture test for resistance spot welded 780TRIP steels. With paint baking cycle after resistance spot welds, peel tests and microhardness were conducted on the as-welded and baked samples. Resistance spot welds in AHSS (Advanced High Strength Steels) are prone to display partial interfacial fractures during fracture test or vehicle crash. Baking cycle increased the load-carrying capacity of the resistance spot welded samples and improved the fracture appearance from partial to full button fracture for the L-type peel tests. Specially, the differences in fracture appearance are apparent when the nugget size of spot welds is small enough to produce the partial interfacial fracture. The comparison of macrohardness and microstructure between as-welded and baked samples showed that there are no large difference in change the fracture mode. However, the results of the instrumented indentation test suggested that fusion zone and HAZ of baked sample have less tensile and yield strength and proves that the tempering effects are applied and enhanced the resistance to fracture on welds with application of baking cycle.

Key Words : Resistance spot welding, 780TRIP steel, Paint baking, Instrumented indentation test

1. 서 론

자동차 생산 공정 중 하나인 도장 공정에서 모든 용접이 끝난 차체는 약 170 °C의 온도에서 도장층을 경화시키는데, 이때의 온도로 인해 자동차 차체는 저온 열처리의 효과가 나타나게 된다. 이것을 Paint baking 효과라고 하며 이러한 Paint baking 효과를 이용하는 예가 BH (소부경화: Bake Hardening) 강판이다.

BH 강판은 차체 판재 성형 후 도장공정중의 저온열처리 시 strain aging (Paint baking 효과)에 의해 항복강도가 상승되는 특징이 있다.

최근 차체 경량화와 충돌안전성 향상을 위해 차체 및 보강재에 고강도 강판의 적용이 증가되고 있는 추세이다. 고강도 강판 중에서도 TRIP 강판은 일반 강판과 달리 오스테나이트와 베이나이트 안정화 원소인 Mn 과 Si를 첨가하고 열처리를 통해 모재조직이 잔류오스테나이트, 베이나이트, 페라이트로 구성된다. TRIP 강판은

우수한 성형성을 보이며 가공 후 잔류오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되어 고강도를 갖게 되는 강판으로 자동차 차체용 강판에 적용되고 있다^{1,2)}. 이러한 고강도 TRIP 강판에서도 BH 강판과 유사하게 Paint baking 이후 항복강도 및 인장강도가 상승하는 것으로 보고되었다³⁻⁵⁾.

특히 Okada와 Tumuluru등은 DP강이나 TRIP강과 같은 고강도 강판의 저항 점용접부에서도 Paint baking 효과에 따른 Load carrying capacity의 상승 및 파단 모드 변화를 보고하였다. 그러나 Paint baking에 따른 저항 점용접부의 거동 변화에 대한 mechanism은 명확하지 않다^{6,7)}.

본 연구는 자동차 차체의 보강재 또는 프레임에 적용되는 780 MPa급 TRIP강의 저항 점용접부에서 Paint baking을 실시한 시험편에 대해 인장강도와 파단 모드의 변화 및 비교 관찰을 통해 Paint baking의 영향을 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 780 MPa급 TRIP 강판을 사용하여 각각의 적정 전류 조건에서 저항 점용접을 실시하고, 특히 실제 도장 공정과 유사한 온도 조건으로 Paint baking을 실시하였다. 그리고 인장시험, 파단분석, 미세조직, 경도 측정과 계장화 압입시험을 통하여 저항 점용접시 Paint baking에 따른 접합부의 변화 및 기계적 물성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 조건

본 실험에서 사용한 재료는 두께 1.4 mm의 780 MPa급 TRIP 강판을 사용 하였으며 재료의 성분원소를 표 1에 나타내었다.

실험에 사용된 용접기는 단상 AC 용접전원을 사용한 공업 정치식(75 kVA)용접기를 사용하였다. 판재의 두께에 따라 ISO 규격을 적용하여 용접을 실시하였으며 실험에 사용된 용접조건을 표 2에 나타내었다. 용접을 위한 전류 구간은 적정 너짓 직경($4\sqrt{t}$)를 가지는 구간으로 설정하였다.

용접 후 Paint baking 조건은 실제 도장 공정과 유사하게 재현하기 위해 4단계로 온도와 시간을 다르게

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of 780 TRIP steels

Mechanical properties			Chemical Compositions (%)				
YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	C	Si	Mn	P	S
420	617	34	0.0987	0.981	1.5	0.0725	0.0015

Table 2 Process parameters used for resistance spot welding

Sheet Thickness (mm)	Electrode			Weld Time (cycle) 3 Pulses	Hold Time (cycle)
	Distance (mm)	Force (kN)	Cooling (L/min.)		
1.4	8.0	4.5	6.0	7-2-7-2-7	15

Table 3 Paint baking conditions used in this investigation

Step	Baking Temperature (°C)	Baking Time (min)
1	170	20
2	140	20
3	140	15
4	140	15

Fig. 1 Schematic configuration of a L-shape peel tensile test sample

하여 실시하였으며 이를 표 3에 정리하였다.

저항 점용접된 시험편을 Baking 실시 후 접합부의 파단 형상 비교를 위해 Fig. 1과 같이 L-shape peel tensile test 시험편을 제작하였다. L-shape peel tensile test 시험편은 용접부에 응력이 집중되기 때문에 다른 시험편 형태 보다 가혹한 조건의 시험을 할 수 있어 파단형태의 차이를 비교하기에 용이하다.

적정 전류 구간에서 As-welded 와 용접 후 Baking cycle을 실시한 시험편에 대하여 각각 인장하중의 측정 및 파단형상을 분석하였다.

적정 너짓 크기를 갖는 전류구간에서 각각의 접합부 단면을 연마하여 질산 3 %의 Nital 용액으로 에칭을 실시하고 광학 현미경(OM: Optical Microscope)과 주사 전자 현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)으로 미세조직을 관찰하였다.

적정 너짓 크기를 갖는 전류구간에서 저항 점용접부 단면의 경도를 측정하였다. 경도측정은 비커스 경도기에서 200 kgf의 하중으로 측정하였으며 단면에서 측정 방법은 두 판재 경계의 0.5 mm 위쪽에서 접합부의 중앙을 중심으로 0.5 mm 간격으로 모재 부분까지 측정하였다.

Fig. 2 Classification of fracture modes after mechanical failure test

2.2 저항 점용접성 평가

L-shape peel tensile test 후 파단 된 시편들을 길이 방향으로 절단하여 단면 분석을 실시하였으며, 파단 모드는 용융부와 열영향부의 파단 위치에 따라 Fig. 2와 같이 분류하였다. Fig. 2의 A와 B와 같은 파단 모드는 계면(Faying surface) 전체에서 파단이 발생하거나 일부만 존재할 경우의 조건을 계면파단으로 정의되고, 용융부의 일부에서 상부판재로 파단이 진행된 조건을 PIF (Partial Interfacial Fracture) 파단으로 판명하였다⁸⁾.

2.3 마이크로 계장화 압입 시험

계장화 압입 시험법은 시편 표면에 수백 마이크로 이내의 압흔을 형성시켜 이때에 나타나는 하중과 변위곡선을 분석하여 재료의 기계적 물성을 측정하는 방법으로, 저항 점용접부의 미세 조직 영역이 협소하기 때문에 미세한 압입자를 이용한 계장화 압입 장비를 이용하여 접합부, 열영향부 및 모재의 미세조직 영역에 대한 인장강도와 항복강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

표 2의 용접조건으로 저항 점용접을 실시한 후 너깃 형상과 전류변화에 따른 너깃 성장을 Fig. 3에 나타내었다. 최소 너깃 직경 $4\sqrt{t}$ 를 만족하는 전류조건은 약 6.0 kA 이상이며 7.0 kA에서 중간날림이 발생하여 최종 너깃 직경이 감소하였다. 각 용접전류별로 양호한 너깃 형상이 관찰되었고 미세 기공과 같은 용접 결함은 관찰되지 않았다. 따라서 각각의 용접 시험편에서 Baking cycle 공정만을 변수로 실험하였으며 용접부 결함들은 분석 시 변수로 고려하지 않았다.

3.1 L-shape peel tensile test

Fig. 4에 780 MPa급 TRIP 강판의 저항 점용접부 파단 형태의 변화를 용접전류 별로 As-welded 와

Fig. 3 Nugget diameter as a function of the weld current for resistance spot welded TRIP 780 steels

Baked 시험편에 대하여 비교하였다. Fig. 4의 파단 형태를 관찰한 결과 용접전류가 5.2 kA 일 때 As-welded 시험편의 경우 계면파단이 관찰되나, Baking 후에 접합부에서 일부 버튼이 존재하는 PIF 파단으로 파단 형태가 개선되었다. 용접시험편에 Baking cycle 이 적용된 시험편의 경우 전 전류 조건에서 파단 형태의 변경 또는 개선된 부분이 관찰되었다. 용접전류구간이 5.4~5.8 kA에서 Baking cycle 후 파단 형태의 변화가 PIF에서 IF 파단으로 현저히 개선되었다. Peel test 후 파단시험편의 관찰만으로도 Baking cycle에 따른 파단 형태의 개선이 명확함을 확인되었다.

As-welded 및 Baked 시험편에 대하여 용접전류에 따른 Peak load (Load carrying capacity)의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 전 전류구간에서 Baking 처리 이후 Peak load의 상승이 관찰되며 5.2 kA의 전류에서 최대 약 1.0 kN 까지 접합부의 Peak load가 증가하였다. 동일한 전류 조건에서 Baking 처리에 따른 Peak load의 증가는 Fig. 4에서 관찰된 파단 형태의 개선과 직접적인 상관관계가 있는 것으로 판단된다. Fig. 5에 Peak load의 측정값에 각각의 파단 형태를 분류하여 나타내었다. 그 결과 파단 형태의 변화가 각각 5.2 kA 와 5.8 kA에서 PIF 및 Full nugget으로 변화되었다.

이러한 파단 형태 개선 및 Peak load의 증가는 전류 조건이 낮을 때 더욱 명확하게 관찰되며 전류조건이 6.4 kA 이상 일 때는 큰 차이를 보이지 않았다. Peak

Fig. 4 Fracture photographs of as-welded and baked samples with increased weld current for resistance spot welded TRIP780 steels

Fig. 5 Peak load as a function of the weld current with for 780TRIP steels the L-shape peel tensile test

load가 Baking 처리 후 상승하는 것은 파단 형태의 변화로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 실험결과는 용접 전류에 따라 버튼 직경이 증가하고 이에 따른 용융부의 파단에 대한 저항이 증가하므로 모재 혹은 열영향부로 파단이 전이되기 때문이다³⁻⁵⁾.

Baking cycle 후 5.2 kA의 전류조건에서 PIF로 파단 형태의 전환과 5.8 kA에서 보이는 Full nugget 파단으로의 변화로 인한 Peak load의 상승은 고강도 강판의 저항 점용접성의 용접 품질 향상과 안전성평가의 측면에서 중요한 부분이며 이러한 파단의 분석과 원인을 다음 절에 서술하였다.

3.2 용접시험편 파단면 분석

Fig. 6에 780 MPa급 TRIP 강판의 저항 점용접부 Baking cycle 후에 L-shape peel tensile test 시험편들의 파단단면을 나타내었다. 각각의 전류 조건에서 Baking cycle 후 일부 시험편의 경우 파단 형상이 현저히 개선된 것을 알 수 있다. 또한 As-welded 및 Baked 시험편 모두 계면(Faying surface)의 코로나 본드부 노치(notch)에서 파단이 시작되었다.

Fig. 6의 5.6 kA 전류조건에서 용접된 시험편의 파단면은 As-welded 및 Baked 시험편 모두 PIF의 파단형태를 보이고 있으나 파단의 양상에는 차이가 존재한다. As-welded 시험편의 경우 파단 시작방향과 그 반대쪽에서 모두 PIF가 발생하였으나, Baked 시험편의 경우 파단의 진행 방향 쪽에서만 PIF가 발생하였다. 이러한 파단 양상은 6.0 kA 전류조건에서도 동일하게 관찰되었다. 6.0 kA에서 용접된 As-weld 시험편은 균열이 접합부를 따라 진행되어 용융부 중간지점에서 상부모재방향으로 파단이 진행된 전형적인 PIF 파단이 관찰된다. Baked 시험편에서는 접합 노치(notch) 부근 또는 계면(Faying surface) 상의 Fusion line 경계부에서 파단의 진행이 억제되며 열영향부와 용융부의 경계면을 따라서 균열이 진행되어 파단이 일어난 Full nugget 파단으로 사료된다.

또한 Fig. 6의 6.4 kA 전류조건에서는 As-welded와 Baked 조건의 시험편 모두 파단시작의 반대 영역에서의 파단은 관찰되지 않으며 6.0 kA 전류조건과 비슷한 파단양상을 보인다.

실제 Peel test 후의 파단 시험편에 대한 분석을 통해서 파단의 진행 양상을 정확히 파악하기 어렵기 때문에 L-shape peel tensile test 과정에서 변위를 단계별로 분리하여 시험 후 파단 단면들을 관찰하였다.

Fig. 7에 6.0 kA 전류조건에서 용접시험편의 인장 변위에 따른 단계별 파단형상으로 균열의 진행양상을

Fig. 6 Fracture analysis of weld cross section for resistance spot welded 780TRIP steels; The arrow indicates the direction of the fracture during a L-shape peel test

Fig. 7 Fracture geometry of weld cross sections for displacement controlled stepping peel test; dotted lines represent the fusion line of each welds

나타내었다. 약 10 mm의 변위에서는 As-weld 및 Baked 시험편 모두 파단양상에 큰 차이를 보이지 않았다. 20 mm 변위에서부터 As-welded 시험편의 경우 계면(Faying surface)에서 균열이 시작되어 파단이 용융부를 지나 상부판재 방향으로 진행되며, Baking 처리된 시험편은 동일한 인장변위일 경우 계면(Faying surface)상의 노치(notch) 인근에서 파단이 용융부로

진전하지 않으며 용융부와 열영향부의 경계로 균열이 진행되어 Full nugget 형태의 파단이 발생한 것을 확인할 수 있다. 파단의 진행 관점에서 Baking cycle 후 용융부에서 발생할 수 있는 미세조직의 변화가 열영향부의 경계에서 계면(Faying surface)의 노치(notch)에서 시작된 파단의 진행을 억제시키는데 영향을 미치는 것으로 예측 된다.

3.3 용접부 경도측정

Fig. 8(a)는 780 MPa급 TRIP 강판의 용접부 Baking 처리 전후의 경도측정 결과를 나타낸 그래프이다. 두 조건 모두 접합부와 열영향부 부근의 경도는 약 400~500 Hv이며 모재의 경도는 약 300 Hv이다. 용융부의 경도는 용접 후 급랭 조직의 생성으로 상승하였으며 Baked와 As-welded 시험편의 경도값은 큰 차이가 없다. Fig. 8의 각 영역별 경도값과 비교한 결과 As-welded 시험편의 모재인근의 열영향부에서 국부 경화영역 관찰되었으나 Baking 처리 후에는 국부적 경화 부분이 소멸되었다. 열영향부의 경화영역 소멸이 Baking 후 저항 점용접의 파단형태 변화와 상관관계가 존재하는지 판단하기 위하여 경화부의 위치를 확인하였으나, Fig. 8 (b)와 (c)에서 국부 경화영역은 모재에 인접한 열영향부인 것으로 확인되었으며 이러한 국부경화영역의 위치는 계면파단 혹은 PIF의 발생 시작점인 계면(Faying surface)의 노치(notch) 영역과는 차이가 있어 Paint baking 효과와는 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

3.4 용접부 미세조직 관찰

저항 점용접에서 용접부의 미세조직은 용융 후 급냉으로 인해 마르텐사이트가 생성되는 접합부(Fusion Zone)와 접합부 근처에서 용융온도 이하의 온도까지

Fig. 8 Hardness profiles across the spot-welds of 780 TRIP steel (a) at As-welded and Baked ; hardness values of each specific regions for (b) As-welded, (c) Baked samples

상승하여 미세조직과 기계적 성질이 변화한 열영향부(Heat Affected Zone)로 구성된다.

Fig. 9는 780 MPa급 TRIP 강판에서 저항 점용접 후와 Baking 처리 후 용접부의 각 영역별 미세조직을 OM과 SEM으로 관찰한 결과이다. TRIP 강판의 모재 미세조직은 페라이트 상과 페라이트 결정립계를 따라 나머지 상인 베이나이트와 잔류오스테나이트로 이루어진다. Fig. 9 (a)의 OM 관찰 조직에서는 밝은 기지조직 부분이 페라이트 상이고 나머지 부분이 베이나이트와 잔류 오스테나이트이며, Fig. 9 (b)의 SEM 모재조직은 OM과는 반대로 어두운 음영의 페라이트 상과 페라이트 주위의 밝은 음영인 베이나이트 및 다각형 모양의 잔류 오스테나이트로 관찰된다.

As-welded 및 Baked 시험편의 비교에서 미세조직의 차이는 관찰되지 않았으며, 이에 따라 Baking 후 전단인장강도와 파단 형태의 변화는 거시적인 미세조직의 변화로 인한 파단 형태의 변화가 아닌 Carbon과 같은 합금성분의 확산에 따른 Tempering 혹은 Dynamic strain aging과 같은 변화가 원인일 것으로 판단된다.

3.5 계장화 압입 시험 분석

Haggag 등은 계장화 압입 시험분석을 통해 저항 점용접부의 국부 인장 물성이 측정 가능함을 보고하였다⁹⁾. 계장화 압입을 이용한 인장 물성 측정은 인장시험편의 제작이 어려운 경우 비파괴적인 연속압입을 통해 국부적인 인장 물성을 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 Baking 처리에 따른 미세조직 및 경도는 큰 변화가 없으나 용접부의 열영향부와 용융부의 인장물성의 차이에 따른 파단모드의 거동 변화를 관찰하기 위해 마이크로 계장화 압입 장비를 이용하여 압입시험 시 발생할 수 있는 응력장 분포 영향을 최소화 한 시험을 실시하였다. 계장화 압입 장비를 이용한 Baking 처리 전후의 기계적 물성 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10(a)의 인장강도 측정 결과에서 As-welded 시험편의 용융부와 모재는 각각 약 1200 MPa와 600 MPa의 강도를 가진다. Baking 후 저항 점용접부의 인장강도는 용융부에서 약 1000 MPa로 전체적인 인장강도의 감소가 확인되었다. Fig. 10(b)에서 보이는 항복강도는 용융부에서 약 800 MPa의 항복강도가 Baking 후 약 700 MPa로 감소되었다.

저항 점용접부에서 용융부와 열영향부 모두 최대인장강도와 항복강도 모두 감소된 것을 확인 할 수 있으며 이는 저항 점용접 후 빠른 냉각에 따른 경화조직이 Baking cycle로 인해 연화된 것으로 사료된다. 본 연구에서 관찰된 저항 점용접부의 파단 모드 변화 및

Fig. 9 Microstructures of the resistance spot welded 780TRIP steels ; (a) optical and (b) SEM images

Fig. 10 (a) Ultimate tensile strength and (b) Yield strength as a function of the distance from the weld center

Load carrying capacity 증가는 Paint Baking의 적용에 따른 접합부의 연화 또는 Bake Hardening에 따른 경화가 원인인지는 명확하지 않다.

Wang 등은 Pre-strain이 적용된 TRIP 강의 경우 Paint Baking에 따라 BH 효과는 베이나이트 변태, 잔류오스테나이트 내 carbon의 증가, 잔류오스테나이트

트 량의 감소, 마르텐사이트의 분율 및 페라이트 기지 내 전위밀도의 상승 등에 영향을 받는 것으로 보고하였다³⁾. 그러나 본 연구에 사용된 780 MPa급 TRIP 강판의 점용접에서는 Pre-strain이 적용되지 않았으며 파단발생부분 또한 모재와는 다른 용융이 발생한 접합부이다. 따라서 Pre-strain이 적용되지 않은 TRIP 강판이므로 BH 효과에 따른 항복강도 및 인장강도의 상승이라고 판단하기는 어렵다. 특히 접합부에서 파단모드의 변화에 따라 Load carrying capacity의 차이가 발생하였으므로 Bake Hardening의 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 또한 계장화 압입 실험 시 최대인장강도와 항복강도가 감소한 결과로부터 경화 현상이 아닌 Tempering의 효과로 용접부 및 열영향부 조직의 인성 증가가 파단 모드의 변화를 초래하여 최종적으로 Load carrying capacity 상승 및 파단모드가 개선된 원인으로 사료된다.

4. 결 론

780 MPa급 TRIP 강판의 저항 점용접 후 용접부의 강도 및 파단에 미치는 Paint baking의 영향에 관해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) L-shape peel tensile test를 이용한 저항점 용접부의 Paint baking의 영향을 비교 분석한 결과, 자동차 공정 중 도장 공정에서 발생하는 Paint Baking 공정 후 780 MPa 급 TRIP 강판 저항 점용접부의 Load carrying capacity가 증가되며 파단형상은 PIF에서 버튼파단으로 개선되었다.

2) Paint baking에 의한 접합부의 Load carrying capacity 및 파단형상 개선은 비교적 낮은 전류 구간에서 그 효과가 크며 일정 전류구간 이상에서는 그 차이가 감소한다.

3) 780 MPa급 TRIP 강판의 저항 점용접 Baking을 실시한 시험편에서 관찰되는 부분적인 경도의 변화는 파단의 시작 지점과는 다른 부위에서 발생하므로 Baking 효과와는 큰상관관계가 없는 것으로 사료된다.

4) 저항 점용접 후 Baking 처리된 시험편의 계장화 압입 실험 결과 항복강도 및 인장강도는 감소되었으므로 파단현상의 변화 및 Load carrying capacity 상승 원인은 Baking 처리에 따른 Tempering 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. S. S. Park, S. M. Lee, Y. J. Cho, N. H. Kang, J. H. Yu, Y. S. Kim, and Y. D. Park : Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 590 Steels, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 46, **672** (2008), 672-683
2. S. S. Park, Y. M. Choi, D. G. Nam, Y. S. Kim, J. H. Yu, and Y. D. Park : Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 1180 Steels, *Journal of KWS.* 26, **625** (2008), 81-91 (in korea)
3. L. Zhao, M.K. Wibowo, M.J.M. Hermans, S.M.C. van Bohemen, J. Sietsma : Retention of Austenite in the Welded Microstructure of a 0.16C-1.6Mn-1.5Si (wt.%) TRIP Steel, *Journal of Materials Processing Technology.* **209** (2009), 5286-5292
4. G. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya, K.K. Ray : Effect of Pre-strain on the Strength of Spot-welds, *Materials & Design.* **30-7** (2009), 2345-2354
5. Z. C. Wang, S. J. Kim, C. G. Lee, T. H. Lee : Bake-hardening behavior of Cold-rolled CMnSi and CMnSiCu TRIP-aided Steel Sheets, *Journal of Materials Processing Technology.* 151 **1-3** (2004), 141-145
6. Murali D. Tumuluru : Effent of Post-weld Baking on the behavior of Resistance Spot Welds in a 780-MPa TRIP Steel, *Sheet Metal Welding Conference XI.* **11-14** (2004) 1-10
7. Toru Okada, Sullivan smith, Nick den Uijl, Tony van der Veldt, Masato Uchihara, Kiyoyuki Fukui : The Effect of Paint Baking cycles on the Spot Weld Strength of AHSS and Consequences for Testing Procedures, *Japan Welding Society.* **30** (2008), 175
8. AWS C1.4M/C1.4:2000 : Recommended Practices for Resistance Welding, 2000
9. F.M. Haggeag, G. E. C. Bell : Measurement of Yield Strength and Flow Properties in Spot Welded and Their HAZs at Various Strain Rates, *International Conference on Trends in Welding Research.* **1-5** (1992), 637-642