비파괴 계장화 압입시험을 이용한 저항 점용접부 물성 평가

최철영 · 김준기^a · 홍재근^b · 염종택^b · 박영도^{c,*}

부산대학교 재료공학부, ^a한국생산기술연구원 용접접합그룹

^b재료연구소 특수합금연구그룹, ^c동의대학교 신소재공학과

Evaluation of Mechanical Properties by Using Instrumented Indentation Testing for Resistance Spot Welds

Chul Young Choi, Jun-Ki Kim^a, Jae-Keun Hong^b, Jong-Taek Yeom^b, and Yeong-Do Park^{c,*}

*School of Materials Science and Engineering, Pusan National University,
Busan 609-735, South Korea*

^a*Advanced Welding & Joining Technology Center Korea Institute of Industrial Technology,
7-47 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon, 406-840 South Korea*

^b*Structural Material Division, Korea Institute of Materials Science, 66 Sangnam-dong,
Changwon, Gyeongnam, South Korea*

^c*Department of Advanced Material Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, South Korea*
(Received January 25, 2011; Revised February 15, 2011; Accepted February 18, 2011)

Abstract Nondestructive instrumented indentation test is the method to evaluate the mechanical properties by analyzing load - displacement curve when forming indentation on the surface of the specimen within hundreds of micro-indentation depth. Resistance spot welded samples are known to difficult to measure the local mechanical properties due to the combination of microstructural changes with heat input. Particularly, more difficulties arise to evaluate local mechanical properties of resistance spot welds because of having narrow HAZ, as well as dramatic changed in microstructure and hardness properties across the welds. In this study, evaluation of the local mechanical properties of resistance spot welds was carried out using the characterization of Instrumented Indentation testing. Resistance spot welding were performed for 590MPa DP (Dual Phase) steels and 780MPa TRIP (Transformation Induced Plasticity) steels following ISO 18278-2 condition. Mechanical properties of base metal using tensile test and Instrumented Indentation test showed similar results. Also it is possible to measure local mechanical properties of the center of fusion zone, edge of fusion zone, HAZ and base metal regions by using instrumented indentation test. Therefore, measurement of local mechanical properties using instrumented indentation test is efficient, reliable and relatively simple technique to evaluate the tensile strength, yield strength and hardening exponent.

Keywords : Instrumented indentation test, High strength steels, Resistance spot weld, Mechanical properties

1. 서 론

최근 차체 경량화와 충돌안전성 향상을 위해 차체 및 보강재에 고강도 강판의 적용이 증가되고 있는 추세이며, 자동차 차체에 적용된 고강도 강판은 안정성

및 신뢰성 확보가 무엇보다 중요하다. 특히 고강도 강판의 저항 점용접부의 용접성은 충돌성능 확보를 위한 필수적 요건이며, 고강도 강판의 높은 강도, 합금 원소 및 도금강판의 도금층 등은 용접성을 저하시키는 원인이 된다[1]. 고강도 강판은 기존 mild

*Corresponding Author : [Tel : +82-51-890-2290; E-mail : ypark@deu.ac.kr]

steel에 비해 가용 전류 영역이 좁은 특징을 가지며, 그 원인은 저항 점용접의 특징인 급냉에 의해 용접 부에서의 martensite와 같은 높은 취성을 가진 조직의 형성으로 비교적 저 전류구간에서 계면파단(interfacial fracture) 발생이 용이하다[2]. Radakovic[3] 등은 계면파단의 발생 원인으로 용접 너트의 크기가 가장 큰 영향을 주인 인자임을 증명하였다. Marya[4] 등은 아연 코팅 강판의 저항 용접의 경우 표면층의 아연이 용융부로 유입되어 응고균열(solidification cracking)이 발생한다고 보고하였으며, 유입된 아연에 의해 초기 발생된 미세균열의 전파 및 연계적인 파단 진행으로 계면파단이 발생된다고 보고하였다. 또한 Goodman[5] 등은 고강도 강판의 높은 합금성분과 phosphorus와 carbon 등이 계면파단의 원인임을 주장하였다. 이러한 계면파단의 발생은 앞선 연구결과를 바탕으로 용접부 및 열영향부의 취약한 조직에 따라 파단이 야기되는 것으로 판단된다.

특히 저항 점 용접이 실시된 경우 용접변수 및 후열처리에 따른 용접부 물성변화를 측정하기가 어려우며, 미세조직의 형성에 따라 용접부와 열영향부 기계적 특성 또한 차이가 발생된다. 저항 점 용접에서 모재의 강도대비 열처 이력 차이에 따른 영역별 기계적 특성 분석은 시편의 채취 및 크기의 제한 때문에 매우 까다롭다. 따라서 본 연구에서는(마이크로) 계장화 압입 시험기를 이용하여 저항 점 용접부의 영역별 기계적 특성 분석을 시도하였다.

일반적인 금속재료의 물성을 평가 방법은 가동중인 설비 및 국부적 물성변화가 심한 재료 등에는 적용이 까다로우며 이에 따라 새로운 기계적 물성 측정법이 요구된다. 또한 기계가공에 의한 소성변형 및 고온에 기인한 용접 등에서 발생하는 물성변화는 구조물의 안정성을 크게 저하시킬 수 있다[6-7]. 따라서 이러한 단점을 보완하고 보다 효율적인 기계적 물성 평가를 위해 현장설비 및 구조물에 비파괴적인 방식을 이용하여 연속으로 국부적인 기계적 물성을 측정하는 장치가 계장화 압입시험기이다. 계장화 압입시험은 비파괴라는 장점뿐만 아니라 이동성이 높아 현장 적용이 가능하며, 비교적 간단한 방법으로 다양한 기계적 물성 평가가 가능하다. 계장화 압입시험법은 하중에 따른 압흔을 형성 시킬 때 나타나는 압흔 깊이를 연속적 측정해서 유도된 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 잔류응력 등의 기계적 물성을 평가하는

방법이다[8-9]. 현장설비의 안전성 확보를 위해 잔류응력의 측정 및 정량적 평가가 필수적이며, 각각의 용접부 영역은 고온에 기인한 미세조직 및 물성변화의 신뢰성 확보가 무엇보다 우선시 되어야 한다. 용접부는 용접 입열의 이력에 따른 물성변화가 다양하고 미세조직의 영향도 복합적으로 나타난다. 특히, 저항 점용접부의 경우 파단에 취약한 열영향부의 크기가 1 mm 내외로 작을 뿐만 아니라, 미세조직 및 경도 변화가 심하기 때문에 기계적 물성평가가 매우 까다롭다. 따라서 본 연구에서는 저항 점 용접부에 계장화 압입시험법을 적용하여 비파괴적인 방법을 활용해서 center of fusion zone, edge of fusion zone, HAZ 및 base metal 각각의 영역에 대해 기계적 물성 평가하였다. 각각의 실험에서 도출된 압입하중-변위곡선의 변화를 분석하여 정량적 평가를 시도하였고 용접부 인장시험의 결과와 계장화 압입시험 결과들을 상호 비교함으로써 계장화 압입시험을 통한 저항 점용접부의 기계적 물성평가 기법의 타당성을 검증하고자 한다. 또한 paint baking 공정을 모사한 열처리가 적용된 저항 점 용접부에 대해서도 계장화 압입시험을 적용하여 후열처리에 따른 물성 변화 또한 관찰 하였다.

2. 이론적 배경

계장화 압입시험법은 강성 압입자를 이용해서 시험편 표면에 하중을 인가하는 하중인가 단계와 이후 시험편에서 하중을 제거하는 단계로 구성된다(그림 1). 여기서 F_{max} 는 최대 압입하중, h_r 은 F_{max} 에서의 최

Fig. 1. Load-depth curves for instrumented indentation test of TRIP780 steel.

Fig. 2. Instrumented indentation test of residual stress evaluated in weld joint.

대 압입 깊이, h_p 는 압입 하중 제거 후 최종 압입 깊이 및 S 는 $F_{\max}$ 에서 하중 제거 곡선에서의 접선 기울기를 뜻한다. 초기 발생된 압입하중에 의해 표면에서는 압입에 대한 변형 발생이 야기되며, 이때의 압입 하중(F)과 압입깊이(h)에 의해 발생된 시험편의 표면 저항 잔류응력 분석을 통해 기계적 물성을 평가하게 된다[10]. 이 때의 잔류응력은 인가된 압입하중(F)의 인가단계와 압입하중을 제거(무응력)한 상태에서의 압입 깊이(h)를 비교 분석하여 측정하게 된다. 이러한 압입하중은 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거쳐 시험 표면에 수백 μm 이내로 압흔을 형성시킬 때 나타나는 압입하중-변위곡선으로 분석되며[11] 이러한 압입 하중에 따른 압입 깊이 곡선의 변화를 그림 2에 나타내었다. 시험편 표면에 평행한 2축 등방향 인장 잔류응력 및 압축 잔류응력이 존재할 때 압입하중-변위곡선의 기울기가 변화된다. 여기서 F_c 는 압축 잔류응력이 인가될 때의 압입하중, F_t 는 인장 잔류응력이 인가될 때의 압입 하중을 뜻한다. 동일한 최대 압입깊이에 도달하기 위해서는 압축 잔류응력을 갖는 시험편은 무응력 상태에 비해 높은 압입하중이 필요하고, 반대로 인장 잔류응력을 갖는 시험편은 낮은 압입하중을 필요로 하게 된다[10]. 따라서 계장화 압입시험은 압축 또는 인장 잔류응력을 갖는 시험편 표면에서 유도된 수직하중을 동일한 압입깊이에 따른 잔류응력

의 분석을 통해 압입하중-변위곡선을 평가할 수 있다.

3. 실험방법

본 실험에서는 두께 1.4 mm인 780 MPa급 TRIP강과 590 MPa급 DP강에 단상 AC전원을 이용하여 저항 점 용접을 실시하였으며, 용접기는 공압정치식 (75 kVA) 용접기를 사용하였다. 용접된 시험편들은 기계적 연마를 거친 후 4% Nital 용액을 이용하여 에칭을 실시하여 center of fusion zone, edge of fusion zone, HAZ 및 base metal의 경계를 명확히 하였다. 용접 조건은 ISO 18278-2 규격을 적용하였으며, 실험에 사용된 시험편은 탄소가 약 0.1 wt.%가 함유된 780 MPa급 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 강판과 590 MPa급 DP(Dual Phase) 강판이다. 비파괴 계장화 압입시험은 프론틱스사의 Advanced Indentation System AIS3000을 이용하였다. 압입시험은 반경 0.25 mm 구형 압입자를 이용하여 최대 압입깊이 100 μm , 압입속도 0.3 mm/min으로 시험을 실시하였다(표 1). 압흔간의 상호 변형 중첩을 피하기 위해 충분한 간격을 두고 실험을 실시하였으며, 실험오차를 줄이고자 반복실험을 통해 결과를 도출하였다. 또한 자동차 도장 공정중의 경화 공정과 유사한 형태인 170°C 20 min, 140°C 20 min, 140°C 15 min 및 140°C 15 min으로 각각 baking을 실시하여 저항 점용접을 실시한 as-welded 시험편과 비교한 물성변화를 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 저항 점 용접부 분석

780 MPa급 TRIP강을 저항 점용접 후 전단인장 시험을 실시한 결과 그림 3에서 보여지듯이 계면 파단이 발생되었다. 실험 결과 전 전류범위에서 파단시험 후 계면 파단이 관찰 되었으며 약 7.0 kA 이상의 전류범위에서 중간날림이 관찰되었다. 기존의 mild steel에서 일반적인 모재를 관통하는 파단은 전혀 관

Table 1. The parameters used for Instrument indentation test of TRIP780 steel

Steel Grade	Maximum depth(μm)	Loading rate (mm/min)	Unloading ration(%)	Indenter (mm)	Indenter type	System
TRIP780	100	0.3	50	0.25	Spherical	AIS3000

Fig. 3. Photograph of fracture on tensile shear test for resistance spot welded TRIP 780 steels.

Fig. 4. Macrograph of cross-section of resistance spot welded TRIP780 steel.

찰 되지 않으며 또한 파단 시험 중 소재의 변형도 관찰되지 않았다. 따라서 590 MPa 급 이상의 고강도 강판 저항 점 용접부에서 이러한 계면파단이 쉽게 발생하며 원인으로서는 소재의 강도 증가에 따른 소재 변형의 억제 및 용접부의 취약한 미세조직에 따른 기계적 특성 저하로 추정된다.

그림 4는 780 MPa급 TRIP강의 저항 점 용접부 단면을 연마 후 에칭하여 용접부를 영역별로 Fusion Zone, HAZ, Base Metal로 구분하였다. Fusion zone의 경우 전형적인 용융 후 냉각에 따른 냉각 조직을 보여주며 HAZ는 영역별 최대 도달 온도의 차이에 따른 조직의 점진적 변화를 보여주고 있다. 저항 점 용접의 경우 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 Fusion Zone의 경우 대부분 martensite로 변태가 된다.

이러한 각 영역의 미세조직 변화는 최종 경도값에도 영향을 미친다. 용접 전류 6.0 kA에서 용접 후 용접부 단면의 미소경도 측정값을 그림 5에 나타내었다. 용융금속의 경도는 약 500 Hv로 가장 높았고 소재의 경도는 약 300 Hv로 용융부 보다 낮았다. 용융금속의 높은 경도는 저항 점 용접 특성 중 하나인 급격한 급냉응고에 따른 마르텐사이트의 생성에

Fig. 5. Hardness distribution of resistance spot welded TRIP 780 steels.

기인한다. Fusion zone 근처에서는 일부 열영향부 경화영역이 관찰되었으며 경도가 최고 650 Hv를 보유했다.

Fusion Zone, HAZ, Base Metal 각 영역별 미소 조직에 대한 관찰 결과를 그림 6에 나타내었다. 가장 높은 경도를 보유했던 Fusion Zone의 경우 대부분 마르텐사이트로 구성이 되어있어 500 Hv 정도의 높은 경도 값을 보유했는 것으로 판단된다. Fusion zone 근처에서 관찰된 열영향부 경화영역의 경우 대부분 마르텐사이트 조직을 보유하고 있으나 martensite packet의 크기가 용융부보다 작아 일부 경도의 상승 효과를 나타내고 있다. 열영향부의 경우 fusion line 부터 소재까지 조직이 점진적으로 변화가 되고 있으며 베이나이트가 많이 관찰 되었다. 이는 열영향부의 최대 도달온도가 A1변태온도 이상까지 도달 하지 못하여 carbon 확산에 따른 베이나이트의 생성이 촉진된 것으로 판단된다. 그림 5와 그림 6에서 각 영역별 경도 및 미세조직을 관찰 하였으나 단지 경도 및 미세조직 관찰만으로는 저항 점용접부의 소성거동을 정확하게 설명하기 어려우므로 계장화 압입시험을 통하여 인장강도, 항복강도 등의 기계적 물성평가를 실시하였다.

4.2. 저항 점 용접부 계장화 압입시험 분석

그림 4는 TRIP780 강에서 저항 점 용접 단면의 계장화 압입이 측정 된 부분을 보여주고 있다. 계장화 압입 시험의 압흔이 소재부터 열영향부 그리고 용접부에 잘 위치하고 있음이 관찰 된다. 특히 열영향

Fig. 6. Microstructures of resistance spot welded TRIP 780 steel. (a) weld metal, (b) near fusion line, (c) HAZ, and (d) base metal.

부의 경우는 영역별로 최대 도달온도에 차이가 존재하기 때문에 미세조직이 fusion line으로부터 모재까지 지속적인 변화를 보여주고 있어 그림과 같은 여러 영역에 대한 계장화 압입시험을 실시하였다. 특히 적용된 계장화 압입 시험의 압흔은 그 소성영역 범위가 수십 mm 이므로 열영향부의 경우 압흔의 위치에 따라 용융부 또는 모재의 물성에 영향을 받을 수도 있기 때문에 각 영역별로 한번의 시험을 실시하였다.

계장화 압입 시험의 신뢰도를 확인 하기 위하여 780 MPa급 TRIP강의 모재에 대한 인장시험과 계장화 압입시험을 통한 결과를 서로 비교하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)에서는 하중의 인가 및 제거의 반복을 거쳐 하중과 압입깊이의 관계 결과를 나타내었고 TRIP 780 MPa급 모재강도는 만능인장시험기를 이용한 인장강도 측정결과와 비교한 결과 계장화 압입시험 인장강도 결과가 거의 유사한 것으로 관찰되었다. 두 결과를 비교해 볼 때 계장화 압입시험을 이용한 용접부의 기계적 물성 평가가 가능하며 결과값의 신뢰성 또한 높을 것으로 판단된다.

그림 8는 비파괴 계장화 압입시험기를 이용하여 DP590 강판의 저항 점 용접부에 대한 center of fusion

Fig. 7. Comparison between (a) tensile curves and (b) instrumented indentation curves of TRIP780 steel.

Fig. 8. Indentation load-depth data and tensile curve from instrumented indentation test for resistance spot welded DP590 steels.

zone, edge of fusion zone, HAZ 및 base metal을 각각 구분 후 연속적인 변형률을 측정하여 압입하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 각각의 영역에 따라 하중의 인가 및 제거의 반복을 거쳐 하중과 압입깊이의 관계를 알 수 있었다. 모든 영역의 시험에 대하여 압입 깊이를 일정하게 유지(95 μm)하고 동일 압입깊이에 발생하는 load(kgf)값이 차이를 나타내었다. 초기 압입하중에 의해 시험편 표면에 인가된 압입하중이 반복하중을 거쳐 압입깊이가 점차 선형적으로 증가되는 것이 관찰되었다. 그림 8의 (a), (b), (c), (d)는 DP590 강판의 저항 점 용접부에서 각각 모재와 용융부의 압입하중-변위를 나타내고 있다. 동일한 압입깊이(약 95 μm)에서 모재와 용융부의 최대하중이 각각 27 kgf와 46 kgf 였다. 이는 모재와 용융부의 경도 및 미세조직 차이에 따른 결과와 일치하고 있다. 또한, 용접부 각영역의 계장화 압입 실험 결과에서도 도출된 변형률-강도 곡선을 그림 8(e), (f), (g), (h)에 나타내었다. 항복강도는 모재에서 418 MPa이며 이는 각 하중의 연속적 인가로부터 계산된 결과이다. 각각의 압입깊이에서 계장화 압입의 하중이 발생 할 때 압입 깊이가 증가에 따른 변형장의 증가로 연속적인 소재의 항복 및 가공경화가 동시에 발생한다.

그림 8(a)에서 (d)로, 즉 모재에서 용융부로 이동할수록, 압입깊이에 따른 각각의 압입 하중이 점차 증가되는 것이 관찰되었다. 그림 8의 (e)~(h)는 계장화 압입 시험에서 각각의 측정된 압입하중을 인장곡선으로 나타낸 것이다. (g) Edge of fusion zone과 (h) Center of fusion zone에서 가장 큰 인장강도를 보이며, (f) HAZ와 (e) Base metal로 갈수록 인장강도가 급격히 감소하는 결과를 보이고 있다. 계장화 압입 측정결과에 따른 DP590 저항 점 용접부 각 영역의 인장곡선을 그림 9에 모두 나타내었다. 고강도 강판의 저항 점 용접의 경우 계장화 압입 시험 결과를 통한 인장 물성 또한 모재와 열영향부 또는 모재와 용융부가 크게 차이가 발생하는 것이 관찰되었다.

Fig. 9. Instrumental indentation test results on resistance spot welds of DP590 steels.

이러한 차이는 용접부의 높은 강도에 따른 변형에 대한 저항은 증가하나 실제 저항 점 용접부의 파단 시 높은 강도에 따른 취성의 증가로 인한 계면파단의 가능성이 높을 수 있음을 추측 할 수 있다. 저항 점 용접부의 각 영역에 대해 인장강도 σ_y , base metal 대비 인장강도 상승율 %, 가공경화 지수 n , 평균 인장강도 σ_u 의 측정값을 정리하면 표 2과 같다. 일반적인 인장시험 시 DP590강의 항복강도는 420 MPa과 인장강도는 617 MPa이며, 계장화 압입시험을 이용한 항복강도와 인장강도가 서로 유사하였고 이를 표 2에 정리 하였다.

3.3. 저항 점 용접부 마이크로 계장화 압입시험 분석

최근 고강도강의 저항 점용접에서는 용접부 load-carrying capacity 향상 방안이 주목 받고 있으며, 자동차 생산 공정 중 도장공정에서 도료의 경화를 위해 baking을 실시하게 되는데 이때의 온도로 인해 자동차 차체는 저온 열처리 효과가 발생하게 되며, baking에 의해 load-carrying capacity가 상승되는 결과가 보고되었다[1]. 이러한 load-carrying capacity상승을 좀 더 세밀하게 관찰하고자 고강도강인 780MP

Table 2. Measured mechanical properties from instrumented indentation for resistance spot welded DP590 steels

Location	σ_y (MPa)	$\Delta\sigma_y / \sigma_y^{BM}$	K (MPa)	n	σ_u (MPa)
Base metal	418		790	0.122	611
HAZ	791	53%	997	0.052	824
Weld side	713	59%	1439	0.136	1098
Weld Center	752	56%	1436	0.13	1101

Fig. 10. Comparison of ultimate tensile strength and yield strength of resistance spot welded TRIP780 steel for as-weld and baked samples.

급 TRIP강판을 as-weld 및 baking조건으로 구분하여 baking적용 전후 load-carrying capacity 변화를 마이크로 계장화 압입시험을 통해 확인하였다. 마이크로 계장화 압입 시험은 압입시험 시 발생할 수 있는 응력장 분포 영향을 최소화 할 수 있는 장점이 있으며, as-weld 및 baking 시험편의 기계적 물성 측정 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 인장강도 측정 결과에서 As-welded 시험편의 용융부와 모재는 각각 약 1200 MPa와 600 MPa의 강도를 가진다. Baking 후 저항 점용접부의 인장강도는 용융부와 모재는 각각 약 1000 MPa와 600 MPa로 용융부의 인장강도가 전반적으로 감소된 것이 확인되었다. 그림 10에서 보이는 항복강도는 용융부에서 약 800 MPa의 항복강도 또한 Baking 후 약 700 MPa로 용융부 인장강도가 전반적으로 감소되었다. 이러한 결과는 저항 점용접의 특징인 빠른 냉각에 따른 경화조직이 baking cycle동안 발생하는 저온열처리 효과로 인하여 martensite에 과포화된 탄소의 확산이 발생 후 ϵ -

carbide가 석출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 석출의 효과로 연성 및 인성이 증가하고 이러한 결과는 계장화 압입 시험의 결과에서도 확인 되었다.

4. 결 론

일반적으로 인장시험기를 활용한 인장시험은 용접부 또는 모재부의 시험편을 채취하여 인장시험을 측정하게 되며, 용접부와 같은 복잡한 물성분포를 보이는 열영향부와 같은 국부적인 부위의 정확한 물성을 모니터링 하는 것은 불가능하다. 그러나 계장화 압입시험은 재료의 유동물성을 평가 및 아주 미세한 크기의 저항 점용접부 각 영역(center of fusion zone, edge of fusion zone, HAZ 및 base metal)을 각각 구분하여 정확한 부위의 다양한 기계적 물성평가가 가능하였고 그 결과 또한 인장시험의 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 관찰되었다. 따라서 계장화 압입시험을 활용한 저항 점용접부의 기계적 물성평가 방법은 비교적 간단하면서 효율적인 측정방법임을 알 수 있었으며, 다양한 산업에서의 적용 및 연구에의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2009AA191)

참고문헌

- [1] J. W. Son, D. G. Nam, D. C. Kim and Y. D. Park: Journal of KWS., **28** (2010) 186.
- [2] S. S. Park, Y. M. Choi, D. G. Nam, Y. S. Kim, J. H. Yu and Y. D. Park: Journal of KWS., **26** (2008) 625.
- [3] D. J. Radakovic and M. Tumulu: American Welding Journal., **87** (2008) 96.
- [4] M. Marya and X. Q. Gayden: American Welding Journal., **84** (2005) 172.
- [5] S. R. Goodman and W. F. Domis: SAE, **10** (1982) 4271.
- [6] M. Koichi: Analysis of welded structure, Pergamon Press, **1** (1980) 148.
- [7] I. C. Noyan and J. B. Cohen: Residual Stresses, Springer-VERLAG, **1** (1987) 276.
- [8] A. V. Zagrebelny and C. B. Carter: Scripta. Mater., **37** (1997) 1869.
- [9] W. J. Ji, Y. H. Lee, W. S. Kim, C. M. K and D. G.

- Kwon: Journal of KWS., **21** (2003) 547.
- [10] KS B 0951-2005: Instrumented Indentation Tests on Welds in Steel Measurement of Residual Stress on Welded Joints.
- [11] H. A. Francis: Transaction of the ASME (Series H), **9** (1976) 272.