

계장화 압입시험법을 이용한 점용접부의 경도평가[§]

진지원* · 곽성종* · 유동옥** · 김태성*** · 강기원*†

* 군산대학교 기계자동차공학부, ** IS Tech, *** LS Cable

Hardness Evaluation of Spot Welding Using Instrumented Indentation Technique

Ji-Won Jin*, Sung-Jong Kwak*, Dong-ok Yoo**, Tae-Seong Kim*** and Ki-Weon Kang*†

*School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

** Production Technology Center, Frame Engineering Group, IS Tech.

*** Production Engineering Center, CAE Technology Group, LS Cable Ltd.

(Received April 20, 2012 ; Revised June 15, 2012 ; Accepted June 22, 2012)

Key Words : Instrumented Indentation(계장화 압입), Galvanized Steel Sheet(아연도금강판), Rockwell Hardness (로크웰 경도), Probabilistic Method(확률론적 방법론)

초록: 본 논문에서는 품질 검사 방법론이 적용된 계장화 압입시험을 수행하여 점용접부의 경도를 평가하였다. 먼저 정상 및 불량 용접조건하에서 제작된 점용접 샘플에 대해 로크웰 경도 및 계장화 압입시험을 실시하였다. 계장화 압입시험을 통해 구한 압입하중-변위선도를 이용하여 계산된 경도를, 동일한 조건의 동일위치에 대한 압입경도시험을 통하여 측정된 로크웰 경도와 확률론적 방법론을 이용하여 비교평가 하였다. 또한 계장화 압입시험을 통하여 추정된 경도 및 이에 대한 확률론적 해석을 수행하여 점용접부의 신뢰성 기반 품질 관리 기준 설정 가능성을 평가하였다.

Abstract: This study deals with hardness evaluation for spot welding by using an instrumented indentation technique to improve the quality of the inspection methodology. First, an instrumented indentation test and a Rockwell hardness test were performed for normal and abnormal spot welding. The hardness to indentation force-displacement curve obtained using each of the tests was compared. Furthermore, an analysis was conducted using the hardness obtained by the instrumented indentation technique. A quality control standard based on reliability was this evaluated for spot welding.

1. 서론

우리나라 자동차 산업은 수출시장에서의 선전에 힘입어 급격한 성장세에 있으며 향후 수년내에 세계 4 위 자동차 생산국을 목표로 하고 있다. 이를 달성하기 위해서는 성능과 친환경성 뿐만 아니라 품질 및 신뢰성 향상에 매우 큰 노력을 기울여야 한다. 이러한 자동차의 품질 및 신뢰성은 기본적으로 구성 부품의 품질 및 신뢰성에 크게 좌우된다.⁽¹⁾ 이의 향상을 위해서는 부품의 설계 및 생산 기술 향상 외에도 원소재 특성 개선 및 열처리 기법 개발 등의 다양한 품질 개선 방안들이 적용되

어야 한다. 특히 현장 생산공정상에서 사용되는 재료 또는 생산품의 기계적 특성을 정확히 평가하는 것은 장기간 운용되어야 하는 자동차 부품의 품질관리 및 신뢰성 향상에 필수적인 요소이다.^(2,3)

일반적으로 재료의 기계적 특성을 평가하기 위해서 사용하는 방법은 재료로부터 시험편을 채취하고 이에 대한 시험을 수행하여 항복강도, 인장강도, 변형경화지수 등을 측정하는 인장시험법이다.⁽⁴⁾ 그러나 국부적으로 급격하게 변화하는 특성을 갖는 재료이거나 시험편을 채취하기 곤란할 경우, 특히 자동차 부품과 같이 대량 생산품의 기계적 물성평가와 이를 통한 품질 평가를 위해서는 시험편의 채취없이 물성을 측정할 수 있는 비파괴적 시험방법이 요구된다.⁽⁵⁾ 이러한 요구조건에 가장 부합되는 시험방법의 한 종류가 계장화 압입시험방법(instrumented indentation technique)이다. 이는 통상 마이크로/나노 압입시험방법(micron/nano indentation

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, kwkang68@kunsan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

technique)으로 호칭되고 있으며, 압입자와 시험 대상 재료 사이의 접촉면적 평가가 요구되는 압입경도 시험의 단점을 극복하고자 압입자에 의한 시험편의 압입변형과 회복 과정을 압입하중-변위곡선(indentation load- displacement curve)으로 연속적으로 측정하는 방법이다.⁽⁶⁻⁹⁾ 즉, 압입단계의 부하곡선(loading curve) 및 하중을 제거하는 제하곡선(unloading curve)을 획득하여 이로부터 경도를 포함한 시험편의 기계적 특성을 평가하게 된다. 특히 경도의 경우, 하중-제하곡선으로부터 용이하게 구할 수 있는 압입하중(indentation force)과 접촉투영면적(projectile contact area)로부터 평가되므로 그 적용이 매우 용이하다.⁽¹⁰⁾ 또한 이러한 마이크로/나노 단위의 계장화 압입시험은 매우 작은 압입깊이 또는 압입하중에 대한 시험이 가능한 비파괴적(nondestructive) 특성을 보유하고 있으므로 생산공정에서의 경도 측정을 통한 전수 검사 및 품질 검사 기법으로서의 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

본 논문의 목적은 자동차 점용접부에 대한 품질 검사 방법론을 이용하여 계장화 압입시험방법의 적용 가능성을 평가하는 것이다. 먼저 정상 및 불량조건하에서 용접된 점용접부에 대해 계장화 압입시험을 실시하였다. 이의 결과를 통하여 계산된 경도를, 동일한 조건의 동일위치에 대한 압입경도 시험을 통하여 측정된 로크웰 경도(Rockwell hardness)와 확률론적 방법론(probabilistic method)을 이용하여 비교평가 하였다. 또한 계장화 압입시험을 통하여 추정된 경도 평가 및 이에 대한 확률론적 해석을 수행하여 점용접부의 신뢰성 기반 품질 관리 기준 설정 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구의 재료는 POSCO 제 아연도금강판(galvanized steel sheet)으로서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두께가 각각 1.3mm와 1.4mm인 강판을 점용접한 시험편을 사용하였으며 Table 1은 용접 조건을 나타낸 것이다. 또한 비정상 용접부를 나타내기 위한 비정상 용접조건은 과전류(abnormal 1), 가압력(abnormal 2), 시간미준수(abnormal 3)로 3가지의 조건을 사용하였다. 이 때 용접불량조건은 실제 생산공정에서 발견되는 불량 조건으로 가장 많은 비중을 차지하는 세 부분을 선정하였다. 계장화 압입시험 및 로크웰 경도시험의 시험편은 66mmx25mm로 하였으며 시험편의 수량은 각각 6개씩 준비하였다.

Table 1 Spot welding condition

	current (kA)	pressure (kgf)	tip dressing	nugget diameter (mm)
passed product	9.8	350	150 holding/1	6~7
failed product	9	280	250 holding/1	9~10



Fig. 1 Spot welding specimen



Fig. 2 Instrumented indenter

2.2 압입경도 및 계장화 압입시험 방법

압입경도시험은 Instron-wilson 사의 2001T 모델을 이용하여 로크웰(Rockwell hardness, HRB)를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 1의 2번 위치로 고정하여 모든 시험을 실시하였다.

계장화 압입시험은 대경테크의 DKTT-3000 모델(Fig. 2)을 사용하였으며 압입자로는 지름 1mm의 텅스텐 카바이드(WC) 구형 압입자(spherical indenter)를 사용하였다. 계장화 압입 시험은 변위 제어하에서 1mm/min의 압입속도로 수행하였으며 압입깊이와 데이터 획득 샘플링 속도는 각각 0.06mm와 100Hz이다. 또한 시험시 발생할 수 있는 점용접부의 불균형을 방지하기 위하여 Fig. 3과 같은 시험편의 형상을 고려한 전용의 고정장치를 사용하였다.

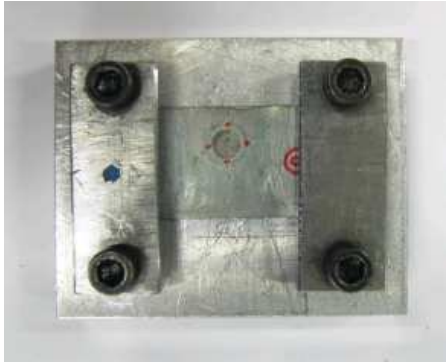


Fig. 3 Device for spot welding specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 압입경도 측정

점용접부의 정상 및 비정상 용접부에 대한 압입 경도시험을 실시하여 로크웰 경도 HRB 를 구하였으며 Table 2 는 측정위치 #2 의 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 표에서 확인 할 수 있는 바와 같이 정상조건에 비해 용접불량조건인 경우 경도 값이 높음을 알 수 있다. Fig. 4 는 이러한 경도 특성을 보다 명확히 검토하기 위하여 정상조건 및 용접 불량 조건인 경우의 경도 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 용접불량조건인 경우 정상 조건에 비하여 높은 경도평균값을 가지지만 동시에 모든 데이터에는 상당한 량의 산포(data scatter)가 존재함을 알 수 있다. 이를 통하여서 점용접부의 경도 특성을 보다 명확히 검토하기 위해서는 결정론적 방법(deterministic method)이 아닌 경도 데이터의 변동성을 고려한 확률론적 방법론(Probabilistic method)이 요구됨을 알 수 있었다.

이를 위하여 정상조건 및 용접불량조건인 경우의 HRB 에 대한 평균 및 표준편차를 이용하여 정규확률분포(normal distribution)의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 구하였다. Fig. 5 는 이의 결과를 나타낸 것으로서 원형 및 삼각형 등의 표시는 식 (1)로 정의된 중앙순위⁽¹¹⁾(median rank)를 이용하여 파손확률로 환산된 실험값을 나타낸 것이다. 여기서 m 및 x_i 는 각각 시험편의 수량 및 경도의 오름차순 순서이다.

$$F(x_i) = \frac{x_i - 0.3}{m + 0.4} \quad (1)$$

Fig. 5 로부터 용접불량조건인 경우가 정상조건에 비하여 높은 경도값을 가지며 또한 이의 분산은

Table 2 Results of Indentation hardness test (HRB)

	Normal	Abnormal 1	Abnormal 2	Abnormal 3
1	25.56	72.31	35.15	42.62
2	31.17	68.45	42.11	43.13
3	19.66	61.81	27.55	42.41
4	19.26	63.80	35.73	60.13
5	22.53	66.09	34.80	45.80
6	37.72	63.14	48.58	53.78
Mean	25.98	65.93	37.32	47.98
St. Dev	7.24	3.91	7.19	7.34

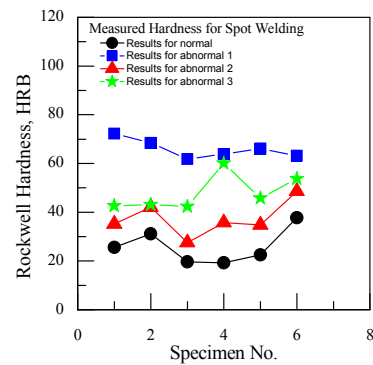


Fig. 4 Results of indentation hardness test (HRB)

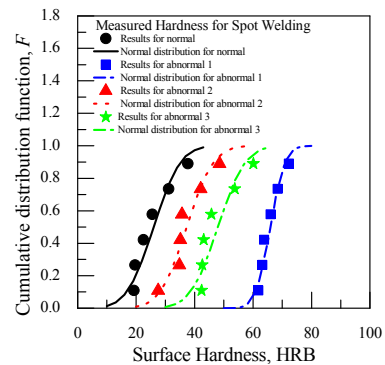


Fig. 5 Cumulative distribution function for HRB

정규분포에 의하여 근사될 수 있음을 확인되었다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 신뢰성(reliability) 개념을 도입한 품질관리 기준의 가능할 것으로 판단 된다.

3.2 계장화 압입시험을 통한 경도 측정

계장화 압입시험은 매우 작은 변형 및 하중을 시험편에 가하여 이의 물성을 평가하는 일종의 비 파괴적 방법이다. 이러한 계장화 압입시험을 통한 시험편의 경도 평가를 위해서는 이의 하중-제하곡선과 접촉 투영 면적의 평가가 필요하다.

이러한 하중-제하곡선과 접촉 투영 면적을 이용

한 다음의 식 (2)를 이용하여 시험편의 경도를 계산할 수 있다.^(9,10)

$$H = \frac{P_{max}}{A_c(h_c)} \quad (2)$$

여기서 P_{max} 및 A_c 는 각각 하중-제하 곡선의 최대하중 및 접촉투영 면적이다. 접촉 투영 면적은 식 (3)으로 표시되는 접촉 깊이(contact depth) h_c 의 함수로서 실험적으로 구할 수 있다.

$$h_c = h_{max} - h_s = h_{max} - \epsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (3)$$

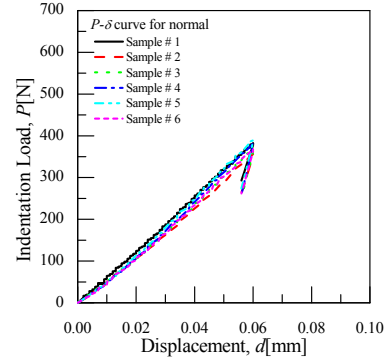
여기서 h_{max} 는 최대 압입깊이로서 압입시 발생하는 탄성 및 소성 변형성분 모두를 포함한다. 또한 h_s 는 탄성변형량을 의미하며 최대하중과 시험편의 강성(stiffness) S 로부터 결정된다. 식 (3)에서 탄성 변형량을 나타내는 마지막 항의 ϵ 은 압입자 선단 형상 상수로 flat punch 의 경우 1, 포물선 모양 혹은 삼각뿔모양의 경우 0.75, 원뿔 모양의 경우 0.72 이다. 또한 시험편의 강성 S 는 식 (4)와 같이 정의되며 제하 곡선에서 최대하중 이후의 상단부 기울기이다.^(9,10) 여기서 h 는 압입깊이이며 P 는 압입하중을 나타낸다.

$$S = dP / dh \quad (4)$$

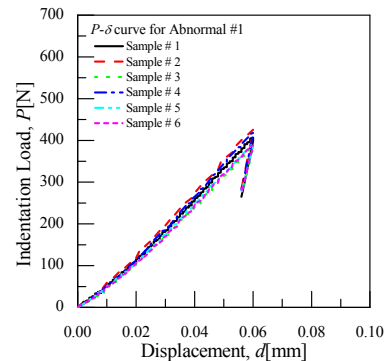
Fig. 6 은 이상에서 설명한 방법을 통하여 적용 접부의 경도를 평가하기 위하여 정상 및 용접불량 조건의 시험편에 대하여 수행된 계장화 압입시험의 하중-제하곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 압입깊이 0.06mm 에서 약 450N 최대하중을 나타내고 있으며 최대 압입깊이에 도달한 후의 제하곡선에서는 제하 초기에 선형적인 거동을 보이고 있다. 또한 제하시의 하중-변위곡선이 매우 유사한 값을 가지나 부하 초기의 기울기 및 최대하중은 조금씩 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

Table 3 은 이러한 과정을 통하여 구한 정상 및 용접불량조건의 로크웰 경도 추정 값을 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 추정된 로크웰 경도는 정상조건보다 용접불량조건의 높은 값을 나타내며 전체적으로 Table 2 의 압입경도시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 이를 보다 명확히 검토하기 위하여 정상 및 용접불량조건에 대하여 측정 및 추정경도를 Fig. 7 에 함께 나타내었다. 이를 통하여 정상 및 용접불량조건의 추정 경도의 평균값은 압입경도시험을 통하여 측정된 결과와 상당히

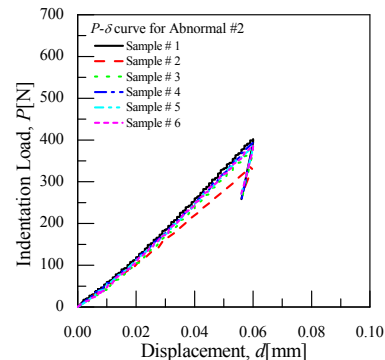
유사하며 따라서 계장화 압입시험을 통한 경도 추정 방법이 일정부분 타당함을 알 수 있다.



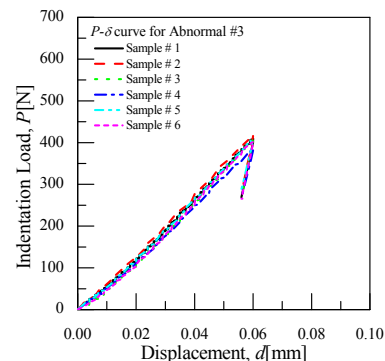
(a) Normal



(b) Abnormal 1

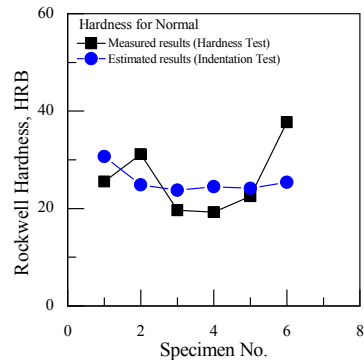


(c) Abnormal 2

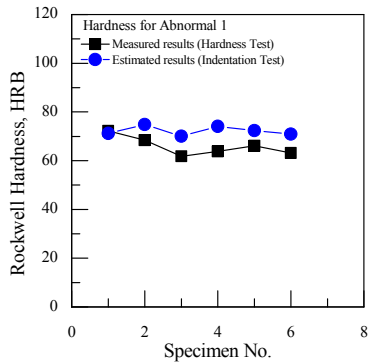


(d) Abnormal 3

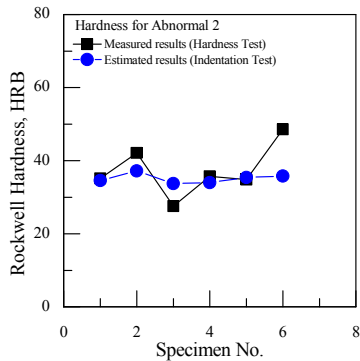
Fig. 6 Load-Displacement curve by indentation test



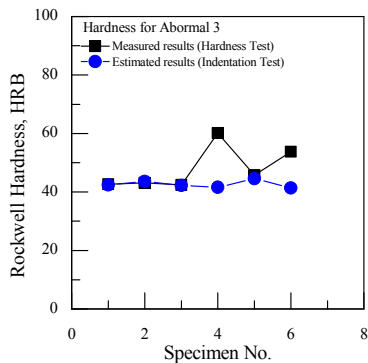
(a) Normal



(b) Abnormal 1



(c) Abnormal 2



(d) Abnormal 3

Fig. 7 Measured and estimated hardness

Table 3 Results of indentation hardness test (HRB)

	Normal	Abnormal 1	Abnormal 2	Abnormal 3
1	30.66	71.17	34.55	42.41
2	24.86	74.87	37.21	43.59
3	23.76	70.04	33.76	42.21
4	24.51	74.10	34.00	41.58
5	24.15	72.38	35.40	44.55
6	25.42	70.96	35.75	41.36
Mean	25.56	72.25	35.11	42.62
St. Dev	2.56	1.89	1.29	1.22

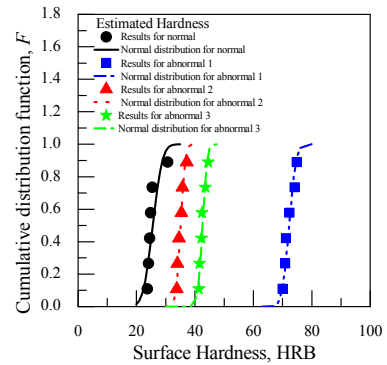


Fig. 8 CDF for estimated hardness (HRB)

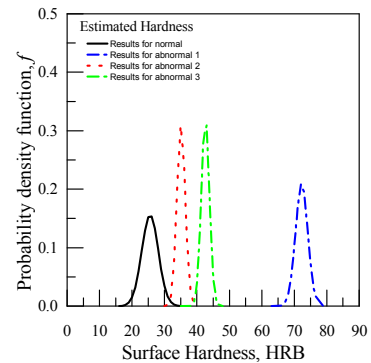


Fig. 9 PDF for estimated hardness (HRB)

이와 같은 정상 및 용접불량조건에 대하여 추정된 로크웰 경도를 정규분포 및 중앙순위법을 이용하여 이들의 누적분포함수 구하였다. Fig. 8 은 이의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 정상의 평균 추정 경도는 용접불량조건에 비하여 상당히 높으며 이의 변동성은 정규분포에 의하여 잘 근사됨을 확인할 수 있다. 따라서 계장화 압입 시험을 통한 점용접부의 경도 추정을 통한 품질

평가가 가능 할 것으로 사료된다.

이를 위하여 Fig. 8 의 추정 경도의 통계적 특성(평균 및 표준편차)를 이용하여 정상 및 불량용접 시험편의 추정 경도에 대한 확률밀도함수(probability density function, PDF)을 구하고 이를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 정상조건의 확률밀도함수는 용접불량조건의 확률밀도함수와 일부 중첩되고 있으며 이를 분석하면 점용접부 경도의 파손확률 및 신뢰도를 평가 할 수 있다. 본 연구의 점용접부의 신뢰도를 99%로 설정 할 경우 추정경도 HRB 35 를 품질 평가 기준을 설정하여야 하는 결과가 도출되었다. 이로부터 계장화 압입시험을 통하여 추정된 로크웰 경도와 이에 대한 확률론적 해석을 통하여 점용접부의 신뢰성 기반 품질관리 기준의 설정 가능성이 확인 되었다. 향후 보다 신뢰도 높은 품질 평가 기준의 설정을 위해서는 정상 및 용접불량조건의 추정경도의 변동성 정량화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량에 적용되는 아연도금강판의 점용접부에 대한 생산공정 품질 검사 기법으로 계장화 압입시험방법의 적용가능성을 평가하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 계장화 압입경도시험을 통하여 측정된 정상 용접 상태의 시험편에 대한 로크웰 경도는 불량용접 상태의 시험편에 비하여 경도 값이 낮게 평가 되었다.

(2) 계장화 압입시험을 통하여 추정된 로크웰 경도의 평균값은 압입경도시험을 통한 측정경도와 잘 일치하였으나 표준편차는 추정 경도의 경우 낮게 평가되었다. 또한 정규분포를 이용한 추정 경도의 확률론적 분석 결과 점용접부의 신뢰성 기반 품질관리 기준 설정 가능성을 확인하였다.

참고문헌

(1) Ko, Y.H., Lee, J.M. and Kim B.M., 2004,

"Determination of the Mechanical Properties of Coated Layer in the Sheet Metal," *Proc. Kor. Soc. Pre Mech. Eng.*, Autumn, pp. 1~4.

(2) Kwak, S.J., Jin, J.W., Kim, T.S., Noh, K.H. and Kang, K.W., 2011, "Hardness Estimation of Compressor Journal using Instrumented Indentation Technique," *Proceeding of KSMTE*, Autumn, p. 214

(3) So, S.W., Hwang, H.T., Lee, J.H. and Choi, H.W., 2011, "Development of Automotive Lower Arm using Hybrid Manufacturing Process," *Journal of KSMTE*, Vol. 20, No. 2, pp. 121~218.

(4) Goo, B.C., Lee, D.H., Kwon D.I. and Choi, Y., 2004, "Evaluation of Mechanical Properties of Welded Joints by an Instrumented Indentation Test and Fatigue Life Evaluation," *J. Kor. Soc. Rail. Eng.*, Vol. 7, No. 2, pp. 142~148

(5) Lee, H.I. and Lee, J.H., 2008, "Evaluation of Material Characteristics by Micro/Nano Indentation Test," *J. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 10, pp. 805~816.

(6) Lee, Y.H., Kim J.Y., Kim, Y.I., Nahm, S.H. and Kwon, D.I., 2006, "Accurate Measurement of Indentation Hardness Through a Three-Dimensional Analysis for a Nanoindent Morphology," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 44, No. 7, pp. 485~490.

(7) Knapp, J.A., Follstaedt, D.M., Myers, S.M., Barbour, J.C. and Friedmann, T.A., 1999, "Finite Element Modeling of Nano-indentation," *J. App. Phy.*, Vol 85, No. 3, pp.1460~1474.

(8) Lee, H.I., Lee, J.H. and Pharr, G.M., 2005, "A Numerical Approach to Spherical Indentation Techniques for Material Property Evaluation," *J. Mech. Phy Sol.*, Vol. 53, 2037~2069.

(9) Maier, P., Richter, A., Faulkner, R.G. and Ries, R., 2002, "Application of Nanoindentation Technique for Structural Characterisation of Weld Materials," Vol. 48, *Mater. Charac.*, Vol. 48, pp.329~339.

(10) Hahn, J.H., Lee, K.R., Kim K.S. and Lee, S.Y., 2002, "Principal and Applications of Nanoindentation Test," *J. Kor. Soc. Pre. Eng.*, Vol. 19, No. 3, pp. 19~26.

(11) Tai, N.H., Yip, M.C. and Lin, J.L., 1998, "Effects of Low-Energy Impact on the Fatigue Behavior of Carbon/Epoxy Laminates," *Comp Sci Technol*, 58(1), pp. 1~8.