계장화 압입시험법을 이용한 차량용 컴프레서 저널 경도 평가

곽성종⁺, 진지원⁺, 김태성⁺⁺, 노기한⁺⁺⁺, 강기원^{*}

(논문접수일 2011. 10. 18, 수정일 2012. 01. 19, 심사완료일 2012. 02. 21)

Hardness Estimation of Compressor Journal for a Use of Instrumented Indentation Techniques

Sung-Jong Kwak⁺, Ji-Won Jin⁺, Tae-Seong Kim⁺⁺, Ki-Han Noh⁺⁺⁺, Ki-Weon Kang^{*}

Abstract

This paper deals with application of instrumented indentation technique for quality inspection methodology for automobile component. For this, the instrumented indentation tests were performed the normal and cracked compressor journal, which is made from spheroidal graphite cast iron and utilized in air-conditioning system. And the Brinell hardness was estimated using the unloading slope and maximum indentation force. With the aid of Normal distribution, this Brinell hardness was statistically compared and analyzed with hardness measured by indentation hardness tests. Also, application possibility of reliability-based quality inspection criteria for compressor journal was evaluated through the probabilistic analysis for the Brinell hardness estimated by instrumented indentation technique.

Key Words : Brinell hardness(브리넬 경도), Indentation hardness test(압입 경도시험), Instrumented indentation test(계장화 압입시험), Probabilistic analysis(확률적 해석), Compressor journal(컴프레서 저널)

1. 서론

최근 우리나라 자동차 산업은 해외 수출시장에서의 선전에 힘입어 급격한 성장세에 있으며 향후 수년 안에 세계 4위 자동차 생산국을 목표로 하고 있다. 이의 달성을 위해서는 자동차의 성능과 친환경성 특성뿐만 아니라 품질 및 신뢰성 향상에 매우 큰 노력을 기울여야 한다. 이러한 자동차의 품질 및 신뢰성은 기본적으로 구성 부품의 품질 및 신뢰성에 크게 좌우된다⁽¹⁾. 이에 부응하기 위해서 구성 부품의 설계 및 생산기술 향상 외에도 재료 특성 개선, 열처리 방법 개발 등의 다양한 재료 품질 개선

방안들이 적용되어야 한다. 또한 개선된 기본 재료의 기계적 특성을 평가하는 절차가 요구⁽²⁾된 것은 물론, 특히 현장 생산공정 상에서 사용되는 재료 또는 생산품의 기계적 특성을 정확히 평가하는 것은 장기간 운용되어야 하는 구조물 부품의 품질관리 및 신뢰성향상에 필수적인 절차이다⁽³⁾.

재료 또는 부품의 기계적 물성을 측정하기 위해서는 재료·부품으로부터 인장시험편을 채취하고 이에 대한 시험을 수행하여 항복강도, 인장강도, 변형경화지수 등을 측정하는 것이 일반적인 방법이다⁽⁴⁾. 그러나 재료의 물성이 국부적으로 변화가 심하거나 시험편을 채취하기 어려운 경우, 특히 자동차 부품과 같이

⁺ 군산대학교 기계공학과 대학원

⁺⁺ LSCable

⁺⁺⁺ 자동차부품연구원

^{*} 교신저자, 군산대학교 기계자동차공학부 (kwkang68@kunsan.ac.kr)

주소: 전북 군산시 미룡동 산68번지

대량 생산품의 기계적 물성 평가와 이를 통한 품질 평가를 위해서는 시험편의 채취 없이 물성을 측정할 수 있는 비파괴적 시험 방법이 요구된다.⁽⁵⁾ 이러한 요구조건에 가장 부합되는 시험방법의 하나로 계장화 압입시험방법(*instrumented indentation technique*)을 들 수 있다. 계장화 압입시험법은 통상 마이크로/나노 압입시험방법(*micron/nano indentation technique*)으로 호칭되고 있으며, 접촉면적 평가가 반드시 요구되는 기존의 압입경도시험의 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*)과 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(*contact area*)로부터 평가되므로 그 적용이 매우 용이하다⁽¹⁰⁾. 또한 이러한 계장화 압입시험은 매우 작은 압입깊이 또는 압입하중에 대한 시험이 가능한 비파괴적(*nondestructive*) 특성을 보유하고 있으므로 생산공정에서의 경도 측정을 통한 품질 검사 기법으로서의 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 자동차부품 등에 대한 생산공정 품질 검사 기법으로서 계장화 압입시험방법의 적용 가능성을 평가하였다. 이를 위하여 차량 냉난방장치에 사용되는 구상흑연주철(*spheroidal graphite cast iron*)제 컴프레서 저널을 대상으로 이의 정상 및 균열 발생 제품에 대한 계장화 압입시험을 실시하였다. 이를 통하여 계산된 경도를, 동일부품의 동일 위치에 대한 압입경도시험(*indentation hardness test*)을 통하여 측정된 브리넬 경도(*Brinell hardness*)와 확률론적 방법론(*probabilistic method*)을 이용하여 비교·평가 하였다. 또한 계장화 압입시험을 통하여 추정한 경도 및 이에 대한 확률론적 해석을 수행하여 컴프레서 저널의 신뢰성 기반 품질 관리 기준 설정 가능성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구의 대상은 차량용 냉난방시스템의 공기 유량 조절에

Table 1 Mechanical Properties of GCD550

Material	Tensile strength	Hardness
GCD550*	$\geq 55(\text{kgf/mm}^2)$	HB 187-225

Table 2 Chemical Composition of GCD550 (wt%)

C	Mn	Si	S	P
3.5~3.8	0.2~0.6	2.3~2.8	≤ 0.001	≤ 0.05

사용되는 구상흑연주철제 컴프레서 저널로서 Fig. 1은 이의 형상을 나타낸 것이다. Table 1 및 2는 컴프레서 저널의 소재인 구상흑연주철(GCD550)의 기계적 특성과 화학적 조성을 나타낸 것이다.

본 제품은 주조 공법으로 1차 제품을 제작한 후 열처리→절삭 가공→열처리→최종가공→품질검사 순서의 생산공정을 거쳐 제작된다. 이러한 컴프레서 저널에서 가장 많이 발생하는 불량은 브라켓 부위의 크랙이다. Fig. 2는 이러한 크랙 중에서 가장 큰 균열이 발생한 제품을 나타낸 것으로서 대부분의 불량 제품에 나타나는 크랙은 미세 균열(*hair crack*)이다. 이러한 미세 균열의 발생 원인은 소재 불량, 열처리 문제 및 가공 방법 등 다양하게 평가될 수 있으나 해당 제조업체에서 조사한 바에 의하면 균열 발생 제품의 경우 HB가 품질관리 기준인 190~210의 범위를 벗어나는 소재 불량 문제가 상당부분을 차지함이 밝혀졌다. 이에 따라 압입경도 및 계장화 압입시험을 위하여 정상 제품과 균열이 발생한 제품 각 20개씩을 준비하였다.

2.2 압입경도 및 계장화압입시험 방법

압입경도시험은 Instron-wilson사의 2001T 모델을 이용하여 로크웰 (Rockwell hardness, HRB) 및 브리넬 경도(Brinell

Fig. 1 Compressor journal

Fig. 2 Crack in compressor journal

Fig. 3 Instrumented indentation tester

Hardness HB)를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 1의 1번 위치로 고정하여 모든 시험을 실시하였다.

계장화 압입시험은 대경테크의 DKTT-3000 모델(Fig. 3)을 사용하였으며 압입자로는 지름 1mm의 텅스텐 카바이드(WC) 구형 압입자(spherical indenter)를 사용하였다. 계장화 압입시험은 변위 제어하에서 1mm/min의 압입속도로 수행하였으며 압입깊이와 데이터 획득 샘플링 속도는 각각 0.06mm와 100Hz이다. 압입경도시험과 계장화 압입시험시 발생할 수 있는 컴프레서 저널 불균형을 방지하기 위하여 전용의 고정장치를 사용하였다. 또한 계장화 압입시험 및 압입경도시험을 통한 경도의 비교를 위하여 계장화 압입시험은 압입경도시험 위치에서 시험편 반시계 방향으로 1mm 이격된 곳에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Compressor journal의 압입경도 특성

구상흑연주철로 제작된 차량 냉난방장치의 컴프레서 저널의 품질 관리 기준인 브리넬 경도 범위(190~230)에 대한 정상 및 균열발생 제품의 경도 특성을 검토하기 위하여 정상 및 균열발생 컴프레서 저널 각 20개에 대한 압입경도시험을 실시하여 브리넬 경도 HB를 구하였다. Table 3은 측정위치 #1의 결과를 정리하여 나타낸 것으로서 정상제품의 경우, 약 205의 HB를 가지며 균열발생 제품은 이보다 낮은 약 180의 HB를 나타내었다. 또한 경도 데이터의 변동성을 나타내는 표준편차를 확인한 결과 균열발생 제품의 변동성이 정상 제품에 비하여 상당히 높음을 알 수 있다. Fig. 4는 이러한 경도 특성을 보다 명확히 검토하기 위하여 정상 및 균열발생 제품의 경도 데이터를 도식한 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 균열발생 제품의 경우 정상 제품에 비하여 낮은 평균값 및 높은 변동성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 컴프레서 저널의 경도 특성을 보다 명확히 검토하기 위해서는 결정론적 방법(deterministic method)가 아닌 경도

Table 3 Results of indentation hardness test(HB)

Normal journal				Cracked journal			
207.9	208.1	195.1	207.9	190.6	159.7	203.9	175
200.1	209.4	207.9	196.5	175.6	166.8	176	171.4
206.7	200.5	199.7	208.1	187.2	165.6	169.9	193.5
200.7	194.0	222.1	188.6	189.7	210.1	184.4	197.2
207.2	217.9	225.9	214.1	183.1	170.5	177.9	161.5
Mean		205.92		Mean		180.48	
St. Dev.		9.41		St. Dev.		13.96

Fig. 4 Results of indentation hardness test(HB)

데이터의 변동성을 고려한 확률론적 방법론(probabilistic method)가 요구됨을 알 수 있다.

이를 위하여 정상 및 균열발생 제품의 HB가 정규분포(normal distribution)를 따르는 확률변수라는 가정하에 각각의 평균 및 표준편차를 이용하여 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 구하였다. Fig. 5는 이의 결과를 나타낸 것으로서 실선은 평균 및 표준편차를 이용하여 구한 누적분포함수를 나타낸 것이고 원형 및 사각형 표시는 식 (1)로 정의된 중앙순위(median rank)를 이용하여 파손확률로 환산된 실험값을 나타낸 것이다.

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

여기서, m 및 x_i 는 각각 시험편의 수량 및 경도의 오름차순 순서이다.

Fig. 5에서 정상 및 균열 발생 컴프레서 저널의 브리넬 경도 HB는 정규분포에 잘 근사되고 있으며 이를 통하여 정규분포를 이용하여 브리넬 경도의 통계적 특성을 묘사할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 Cumulative distribution function for HB

Fig. 5로부터 균열발생 제품의 경우가 정상 제품에 비하여 낮은 평균값과 높은 변동성을 가짐이 확인되었다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 신뢰성(reliability) 개념을 도입한 품질 관리 기준의 가능할 것으로 판단된다.

3.2 계장화 압입시험을 통한 경도 추정

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

이러한 하중-제하곡선과 접촉 투영 면적을 이용하여 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 접촉 투영 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 압입 깊이로서 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 압자단단 형상 상수로 flat punch의 경우 1, 포물선 모양 혹은 삼각뿔모양의 경우 0.75, 원뿔 모양의 경우 0.72이다. 또한 시험편의 강성 S 는 식 (4)와 같이 정의되며 제하 곡선에서 최대하중 이후의 상당부 기울기이다.^(9,10)

(a) Normal journal

(b) Cracked journal

Fig. 6 Load-Displacement curve by indentation test

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

여기서, h 는 압입깊이를 나타낸다.

Fig. 6은 이상에서 설명한 방법을 통하여 컴프레서 저널의 경도를 평가하기 위하여 정상 및 균열발생 제품에 대하여 수행된 계장화 압입시험의 하중-제하 곡선을 나타낸 것이다. 계장화 압입시험을 통한 하중-제하 곡선은 압입깊이 0.06mm에서 약 700N의 최대하중을 나타내고 있으며 최대 압입깊이에 도달한 후의 제하곡선에서는 제하 초기에 선형적인 거동을 보이고 있다. 그러나 각 하중-제하 곡선은 시험편간 편차가 상당히 심한편이며 이러한 경향은 균열발생 제품의 경우에 보다 심각함을 알 수 있다. 이러한 경향은 압입시험을 통하여 구한 경도의 변동성을 나타낸 Fig. 5와 유사한 결과이다.

Table 4는 이러한 과정을 통하여 구한 정상 및 균열발생 컴프레서 저널의 브리넬 경도 추정값을 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 추정된 브리넬 경도는 정상 제품의 경우 약 206로

균열발생 제품의 180보다 상당히 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과를 보다 명확히 검토하기 위하여 정상 및 균열발생 제품에 대하여 측정 및 추정 경도를 Fig. 7에 나타내었다. 이를 통하여 정상 및 균열발생 제품의 추정 경도의 평균값은 상당히 유사하며 따라서 계장화 압입시험을 통한 경도 추정 방법이 일부분 타당함을 알 수 있다. 그러나 경도의 변동성을 나타내는 표준편차를 비교해보면, 추정경도의 표준편차가 측정 경도보다 상당히 높음을 알 수 있다.

Table 4 Estimated hardness through indentation test(HB)

Normal				Cracked			
237.2	258.4	213.0	228.4	193.7	176.7	224.0	139.1
215.3	227.2	187.7	164.7	210.9	188.9	207.0	219.8
183.0	147.5	210.0	217.5	158.2	181.8	174.3	230.7
206.1	207.6	228.6	208.8	192.1	173.2	127.4	207.7
190.0	212.0	204.0	178.8	186.8	129.9	169.1	
Mean		206.29		Mean		179.92	
St. Dev.		25.64		St. Dev.		33.99

(a) Normal journal

(b) Cracked journal

Fig. 7. Comparison of measured and estimated hardness

이와 같은 추정 경도의 변동성을 확인하기 위하여 정상 및 균열발생 제품에 대하여 추정된 브리넬 경도를 정규분포 및 중앙순위법을 이용하여 이들의 누적분포함수를 구하였다. Fig. 8은 이의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 정상 제품의 평균 추정 경도는 균열발생 제품에 비하여 상당히 낮으며 누적분포함수의 기울기로 평가되는 변동성은 균열발생 제품이 보다 높음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 측정 경도의 누적분포함수를 나타낸 Fig. 5와 함께 비교하면 추정 경도의 경우가 정상 및 균열발생 제품 모두에 대하여 보다 높은 변동성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 측정 경도 평가시 사용된 압입경도시험에 비하여 계장화 압입시험시의 압입자의 직경이 작고 또한 압입하중이 작아 표면 거칠기(surface roughness)의 영향을 상대적으로 많이 받기 때문이라고 판단된다. 그러나 측정 및 추정 경도 결과값을 나타낸 Table 3 및 4를 함께 비교하면 변동성의 존재에도 불구하고 평균 경도는 측정 및 추정 경도가 상당히 유사하며 이러한 경향은 정상 및 균열발생 제품 모두에서 확인되고 있다. 따라서 표면 거칠기에 의한 변동성의 증가 현상을 고려할 수 있다면 계장화 압입시험을 통한 컴프레서 저

Fig. 8 CDF for estimated hardness (HB)

Fig. 9 PDF for estimated hardness (HB)

널의 경도 추정을 통한 제품 불량 판정을 가능할 것으로 사료된다.

이를 위하여 Fig. 8의 누적분포함수에 사용된 통계적 특성(평균 및 표준편차)를 이용하여 정상 및 균열발생 제품의 경도에 대한 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 구하고 이를 추정 경도에 대하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 정상 제품의 확률밀도함수는 균열발생 제품의 확률밀도함수와 중첩되고 있으며 이를 분석하면 컴프레서 저널 경도가 파손확률 및 신뢰도를 평가할 수 있다. 본 연구의 컴프레서 저널의 신뢰도를 68%로 설정할 경우, 정상제품의 추정 경도 기준은 HB 210 이상, 신뢰도 95.5%로 설정하면 HB 240 이상으로 설정해야 함을 의미한다. 이로부터 계장화 압입시험을 통하여 추정된 브리넬 경도와 이에 대한 확률론적 해석을 통하여 컴프레서 저널의 신뢰성 기반 품질관리 기준의 설정이 가능성이 확인되었다. 그러나 정상 및 균열발생 제품의 추정경도에 존재하는 많은 변동성으로 인하여 확률밀도함수의 중첩 부분이 너무 크므로 정상 및 균열발생 제품의 추정 경도의 변동성 정량화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량 냉난방장치에 사용되는 구상흑연주철제 컴프레서 저널을 대상으로 생산공정 품질 검사 기법으로서의 계장화 압입시험방법의 적용 가능성을 평가하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 압입경도시험을 통하여 측정된 정상 제품의 브리넬 경도는 균열이 발생한 균열발생 제품에 비하여 약 20% 높게 평가되었다. 또한 이의 표준편차는 균열발생 제품의 경우가 크게 평가되었으며 이러한 측정 경도의 변동성은 정규분포에 잘 근사됨을 확인하였다.
- (2) 계장화 압입시험을 통하여 추정된 브리넬 경도의 평균값은 압입경도시험을 통한 측정경도와 잘 일치하였으나 표준편차는 추정 경도의 경우가 크게 평가되었다. 또한 정규분포를 이용한 추정 경도의 확률론적 분석 결과 컴프레서 저널의 신뢰성 기반 품질관리 기준 설정 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Ko, Y. H., Lee, J. M., and Kim, B. M., 2004, "Determination of the Mechanical Properties of Coated Layer in the

Sheet Metal," *Autumn Conference Proceedings of KSPE*, pp. 1~4.

- (2) Baek, S. Y., and Yun, K. H., 2010, "A Study on Fatigue Design Automation of Plug- and Ring-type Gas-welded Joints of STS301L Taking Welded Residual Stress into Account," *Transactions of the KSME A*, Vol. 34, No. 9, pp. 1137~1143.
- (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," *Journal of the Korean Society for Railway*, 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," *Transactions of the KSME 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. of 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. of 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. of Mech. Phy. Sol.*, Vol. 53, pp. 2037~2069.
- (9) Maier, P., Richter, A., Faulkner, R. G., and Ries, R., 2002, "Application of Nanoindentation Technique for Structural Characterisation of Weld Materials," *Mater. Charac.*, Vol. 48, No. 4, 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. of KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 19~26.