

초음파법에 의한 스프링강의 재질평가에 관하여

김상수* · 하경준* · 김선진**

*부경대학교 기계공학과 대학원

**부경대학교 공과대학 기계공학부

On Evaluation of Material Properties in Spring Steels by Measurement of Ultrasonic Techniques

SANG_SU KIM*, KYUNG JUN HA* AND SEON JIN KIM**

*Department of mechanic Engineering, Pukyong National University

**Department of mechanic Engineering, Pukyong National University

Key Words: Ultrasonic 초음파, Attenuation Coefficient 감쇠계수, Virker's Hardness 비커스 경도, Microstructure 미세 조직, Charpy Impact Test 샤르피 충격시험, Spring Steel 스프링강

ABSTRACT: The general purpose of this paper is Evaluation of material properties in spring steels by investigate correlation between ultrasonic attenuation and virker's hardness, charpy impact properties, microstructures. The three test specimens of the 490×90 mm plates and 20 mm thick are used but differ in heat treatment, one is rolled plate, the second is quenched and then tempered, and the third is quenched. ultrasonic attenuation were obtained at fifteen locations on the plates. In order to investigate the correlation between hardness (especially , HV) and the attenuation, the virker's hardness and the microstructures were observed for three spring steels. also the charpy impact test were carried out at the room temperature in order to investigate the relationship between impact properties and the attenuation. The experimental results obtained from three different spring related to the heat treatment conditions and attenuation coefficient is increased with increasing the hardness(HV). Ultrasonic attenuation coefficients have shown are ability to distinguish among spring steels.

1. 서 론

현재 자동차, 항공기 등에 사용되고 있는 기계부품에서는 피로한도의 향상이 강하게 요구되고 있다. 특히, 환경문제나 경량화와 같은 성에너지에 문제에 관련해서 그 요구가 더욱 강하다. 일반적으로 기계부품의 피로강도 향상 방법으로는 다음과 같은 것이 유용하다. 첫째, 재료의 표면거칠기(surface roughness)을 되도록 작게하여 응력집중을 작게하는 방법과, 둘째 재료의 경도(HV)를 향상 시키는 방법, 셋째 표면근방에 큰 압축잔류응력(compressive residual stress)을 도입하는 방법 등이 열거된다. 특히 자동차용 스프링강의 경우는 쇼트 피이닝(shot peening)에 의한 표면근방의 큰 압축잔류응력을 도입하여 피로강도를 향상시키는 것이 현장에서 이루어지고 있다. 잔류응력(residual stress)은 외력이 제거된 상태에서 재료내부에 존재하는 응력으로서 압연판의 제조과정 중의 열처리나 용접, 쇼트 피이닝 등

기계적인 가공 작업에 의하여 재료의 내부에 존재하게 된다. 최근에 이러한 잔류응력의 평가나 기계적 성질을 비파괴적 방법(nondestructive method)으로 평가하려는 연구가 관심의 대상으로 되고 있다.

제조과정 중의 품질이나 최종 단계 제품의 품질의 평가에는 현재까지 주로 제품(혹은 부품)에 인위적 손상을 가하는 파괴적 방법으로 주로 수행되었다. 그러나, 비파괴시험법의 도입은 생산과정 또는 생산제품에 대해 전면적인 실시간 평가가 가능하게되어 제품의 생산도중에 실시간 피드백(feed-back)으로 고정도의 품질관리가 가능하게 되고 시험편의 제조를 위한 별도의 공정이 생략되어 시간적 경제적 장점을 가지고 있다. 현재까지 보편적으로 사용되고 있는 파괴적 방법에 의한 기계적 성질이나 미세조직의 평가는 시료의 채취 및 절단, 마운팅, 연마, 미세조직 관찰 등의 여러 가지 공정을 거쳐 수행되므로 재료의 전체적 시험(over-all testing)이 불가능하고 시험편의 채취에서 조직의 관찰이나 기계적 성질의 평가에 이르기까지 많은 시간과 인력과 비용이 소모되는 물론 제조공정에 신속한 피

김상수 : 부산광역시 남구 용당동 산100 부경대학교 용당캠퍼스 9공학관 104호 051-620-1608 con2088@hanmail.net

드백이 어렵다. 따라서 재료특성의 비파괴적 평가(NDE: Non-destructive Evaluation)는 파괴적 평가의 단점을 극복할 수 있는 충분한 가능성을 가지고 있다. 잔류응력의 평가나 재질 등의 기계적 성질을 비파괴적으로 평가하기 위한 방법으로는 여러 가지가 있지만, 그 중에서도 초음파기법을 이용하면 설비가 간단해지고 운용이 안전하여 현장에서의 평가에 아주 용이하다. 초음파법을 이용하여 재료의 열화나 미세조직 및 강도평가를 비파괴적으로 평가하기 위한 시도는 예전부터 많은 관심의 되었으며 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 현재 자동차용 판 스프링(leaf spring)으로 많이 사용되고 있는 SUP9A강을 열처리 제조조건을 다르게 한 강종에 대하여 미세조직과 경도 및 샤르피충격치를 조사하였으며, 그리고 초음파 감쇠계수(attenuation coefficient)를 측정하여 이들의 상관관계를 실험적으로 고찰하고자 하였다. 궁극적으로는 초음파법에 의한 재질의 비파괴적 평가에 목적을 두고 있음을 부기한다.

2. 초음파의 감쇠

2.1 초음파 속도

음파의 속도는 탄성률과 밀도에 영향을 받는다.

1) 기체 및 액체중의 속도

액체나 기체에서는 가로탄성률이 없으므로 횡파는 존재할 수 없다.(단 점성이 강할 경우는 약간 진행될 수 있다.)

이 경우 종파의 속도는 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

(V : 속도 K : 체적탄성률 ρ : 밀도)

2) 고체중의 음파속도

① 종파속도

지름이 파장에 비하여 작은 막대의 축 방향으로 전파하는 경우 길이 방향 및 가로 방향 진동이 존재하므로 체적탄성률은 영율과 같다.

$$V_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(V_b : 속도 E : 영율 ρ : 밀도)

지름이 파장에 비하여 충분히 큰 막대의 축 방향으로 전파하는 경우의 전파속도는 다음과 같다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

(V_L : 종파속도 ν : 프와송의 비)

즉, 굵은 막대에서의 종파속도는 가는 막대에서의 종파속도보다 빠르다.

② 횡파속도

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

(V_s : 횡파속도 G : 탄성전단율)

2.2 초음파 감쇠

재료특성에 관계되는 파라미터에는 속도와 감쇠 계수가 있다. 금속에서 결정립의 크기와 감쇠측정에 기초된 많은 문헌이 있으며, 작은 진폭으로 주어진 평면파는 초음파원으로부터 거리 x에서 에너지 강도(I)는 다음 식으로 표현된다.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

$$\ln(I/I_0) = -\alpha x$$

$$\frac{\log_{10}(I/I_0)}{\log_{10} e} = -\alpha_0 x$$

$$\log_{10}(I/I_0) = -\alpha_0 (\log_{10} e)x$$

$$10 \log_{10}(I/I_0) = -\alpha_0 (10 \log_{10} e)x$$

$$20 \log_{10}(h/h_0) = -4.34x = \alpha \cdot x$$

$$\left(\because \frac{I}{I_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = \left(\frac{h}{h_0}\right)^2\right)$$

따라서, 다음 식이 성립한다.

$$\alpha_0 = \frac{1}{x} \times 20 \log \frac{P_0}{P_x}$$

α₀ : [1/mm] α : [dB/mm] P : 음압 V : 계측기의 신호전압 h : 탐상기 스크린 에코높이

3. 실험방법 및 절차

3.1 실험재료

본 연구에 사용된 재료는 자동차용 판 스프링의 용도로 많이 사용되는 SUP9A 강재로, 일례로 압연재에 대한 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 시험편은 열처리를 행하지 않은 압연재(As Rolled)와 열처리를 행한 강재로 940℃에서 15분간 담금질(Quenching)을 행한 재료와 담금질 후 490℃에서 30분간 뜨임(Quenching & Tempering)처리한 3가지 종류의 재료를 사용하였다. Table 4는 본 실험에서 사용된 제조조건과 시험편 기호를 나타낸다.

Table 2 Chemical composition of SUP9A (As Rolled)

| ELEMENT | | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|--------------------|-----|------|------|------|-------|-------|------|
| Mill's Certificate | Min | 0.56 | 0.15 | 0.70 | - | - | 0.70 |
| | Max | 0.64 | 0.35 | 1.00 | 0.035 | 0.035 | 1.00 |
| TEST RESULT | | 0.62 | 0.28 | 0.88 | 0.014 | 0.005 | 0.90 |
| AISI5160 | Min | 0.56 | 0.20 | 0.75 | - | - | 0.70 |
| | Max | 0.64 | 0.30 | 1.00 | - | - | 0.90 |

Table 3 Mechanical Properties of SUP9A (As Rolled)

| Material | | Yield point (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Grain Size | Non-Metallic Inclusion (%) |
|----------|-------------|-------------------|------------------------|----------------|------------|----------------------------|
| SUP9A | Mill Cert. | 1098 | 1225 | 9 | 6.0 | 0.15 |
| | Test Result | 이상 | 이상 | 이상 | 이상 | 이하 |
| | | 1243 | 1311 | 11.3 | 7.5 | 0.07 |

Table 4 Descriptions of the 20mm thick SUP9A

| Plate | Identifying Marks | Description |
|-------|-------------------|----------------------------|
| 1 | SUP9A, RM | As Rolled |
| 2 | SUP9A, QTM | Quenched and then Tempered |
| 3 | SUP9A, QM | Quenching |

3.2 경도시험 및 미세조직관찰

스프링 강판의 열처리 제조조건에 따른 경도변화와 미세조직 등의 변화를 비교 관찰하기 위하여, RM, QTM 그리고 QM재에서 각각 시편을 채취하여, 경면을 만들고, 결정입계와 미세조직을 검출할 수 있는 부식액에 부식시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척한 후 건조시켜 광학현미경의 배율을 200, 500배로 하여 관찰하였다.

경도측정은 마이크로 비커스 경도계를 사용하였으며, 시편의 중앙과 좌우로 각각 2번씩 2mm 간격으로 하중을 500g의 압자를 사용하여 10초 동안 하중을 유지시킨 후 마이크로 비커스 경도(HV)를 측정하였다.

3.3 초음파 감쇠계수 측정

초음파 감쇠계수의 측정은 탐촉자 내의 압전재료에 적정 펄스전압을 가하여 진동(초음파)을 만들고 그 진동이 시험체 배면에서 반사되어오는 것을 압전재료가 전기적 신호로 바꾸어 CRT상으로 나타내게 하는 펄스 반사법중에서 수직탐상법으로 측정하였으며, 또한 초음파의 산란 및 감쇠의 정밀한 측정을 위해서 탐촉자와 재료사이의 신호의 감소를 최대한 줄이기 위하여 접촉매질(couplant)을 사용하였으며, 표면의 조도를 개선하기 위해서 Sand Paper를 사용하여 측정 부위의 시험편 표면을 동일하게 연마하였다. 표준시험편은 KS B 0831에 규정된 STB-A1을 사용하였으며 초음파의 발생과 수신을 위해서 Parametric사의 $\phi 10$ 주파수 5MHz인 탐촉자를 사용하였으며, USD-15 초음파 탐상기를 사용하여 초음파 파라미터를 측정하였다. 본 실험에 사용된 장비와 측정에 사용된 장치의 개략도를 Table 5 및 Fig. 1에 각각 나타내었다.

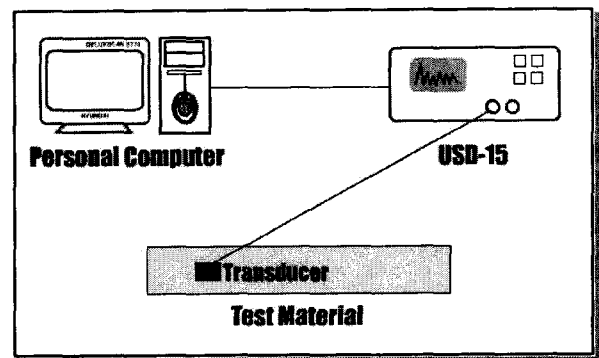
Fig. 1에서와 같이 초음파가 탐촉자로부터 시험편에 수직으로 입사하게 되면 시험편의 표면, 배면에서 반사가 일어난다. 탐상기 화면에서 보면 세로축이 음압, 가로축이 음파

Table 5 Equipment for measurement of ultrasonic parameters

| Equipment | Part Num. | Production |
|--------------|----------------|-------------|
| U.T Detector | USD-15 | KrautKramer |
| Oscilloscope | 9310A | Lecory |
| Transducer | 5MHz $\phi 10$ | Panametrics |
| U.T couplant | ZG-F | KrautKramer |

가 이동한 거리가 된다. 따라서 표면에서 반사된 음파가 화면상에서 가장 왼쪽에 표시되고 다음 배면, 그 다음엔

Fig. 1 Layout of ultrasonic attenuation equipment



표면에서 다시 반사가 일어나 시험편 내부를 한번 더 왕복한 파가 순서대로 표시된다. 본 실험에서는 초음파의 전파특성상 근거리 음장에서는 감쇠의 효과가 없고, 음압의 변화가 심하기 때문에 신호의 크기에 의존하는 결함의 분석이 정확하지 않으므로, 이 영역에서의 검사는 가능하면 피하기 위해서 두 번째와 세 번째 신호의 크기를 비교하여 감쇠계수를 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용한 시험편의 형상과 크기 및 초음파 감쇠계수의 측정위치를 나타낸 것이다.

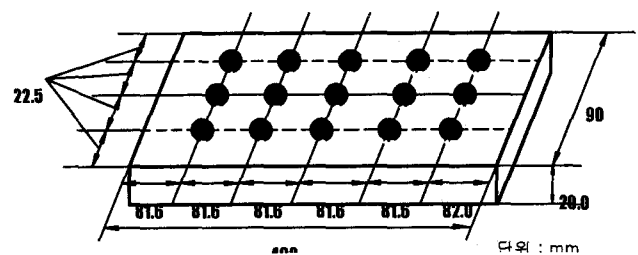


Fig. 2 Shape and dimension of the specimen for measurement of ultrasonic attenuation (20mm thick)

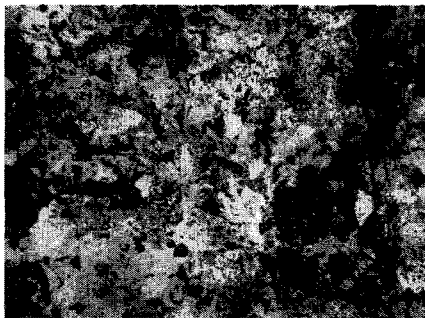
3.4 샤르피 충격시험

충격시험을 위해서 ASTM E23 Type 시험편을 제작하였으며, 충격시험기는 KDI-300-2 (W= 22.24kg R=750mm) 를 사용하였다. 시험편은 3종류의 열처리 시편당 5개씩 제작하여 실험을 행하였다.

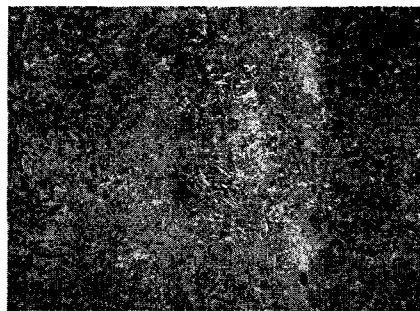
4. 실험결과 및 고찰

4.1 열처리제조 조건에 따른 미세조직의 변화

샤르피 충격시험 열처리 제조 조건에 따른 미세조직의 변화 Fig. 3은 열처리 제조 조건에 따른 미세조직을 광학현미경 (Optical Microscope)으로 관찰한 사진이다. 부식은 3% 나이트, 3% 피크랄 그리고 0.05% 염산을 혼합한 용액에 약 10초간 부식시킨 후 500배의 비율로 관찰한 것이다. (a)는 RM재의 압연한 그대로 경우이고, (b)는 QTM재로 담금질한 후 뜨임을 행한 경우이며, 그리고 (c)는 QM재로 담금질한 강 of 현미경 조직 사진이다.



(a) RM



(b) QTM



(c) QM

Fig. 3 Microstructure of the plates ($\times 500$)

Fig. 3의 (a)는 열간 압연한 판재로 잔류 오스테나이트 (austenite)의 조직을 볼 수 있으며, (b)는 담금질한 후 뜨

임을 행한 것으로 마르텐사이트 기지로부터 탄화물을 석출시킨 템퍼드 마르텐사이트 (tempered martensite) 조직이며, (c)는 담금질한 강으로 전형적인 침상의 상이 나타나는 마르텐사이트 (martensite) 조직을 보이고 있다. 이것으로부터 열처리 제조 조건에 따른 경도는 RM재, QTM재, QM재의 순으로 증가할 것으로 예상된다.

4.2 열처리제조 조건에 따른 경도의 변화

Fig. 4는 각 열처리 조건에 대한 비커스 경도값을 나타낸 것이다. 압연재인 RM재의 경우가 가장 낮은 경도값을 보였으며, QTM, QM재의 순으로 증가하였다. 열처리 제조 조건에 따른 미세조직이나 경도의 변화는 재료공학적 지식으로 설명될 수 있다. Fig. 5은 본 실험에서 사용한 스프링강판의 비커스 경도 분포를 정규확률지에 나타낸 것이다. 그림 중의 기호, RM, QTM, QM는 Fig. 4에서 의미하는 것과 같다. 비커스 경도의 분포는 열처리 조건에 관계없이 정규분포에 따른다고 할 수 있다. 그러나 그 변동의 정도는 열처리의 영향이 있고, 특히 QM재에 있어서는 비교적 큰 변동을 나타내었다. 이는 S45C강의 경도분포에서와 비슷한 경향을 보였으며, 경도분포는 정규분포에 잘 따른다고 할 수 있다.

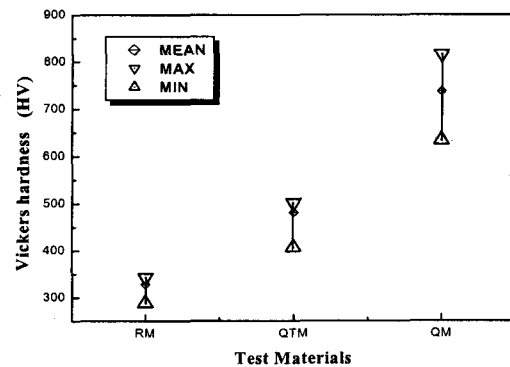


Fig. 4 Hardness (HV) for each plate

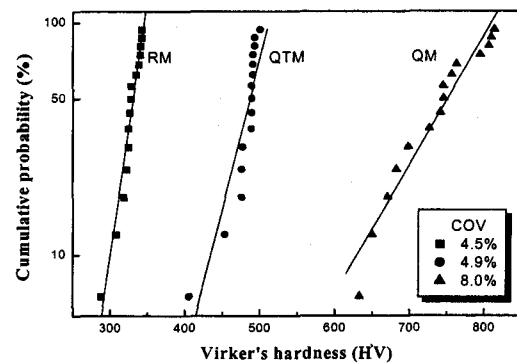


Fig. 5 Normal plots of HV for each plate

4.3 열처리제조 조건에 따른 충격에너지의 변화

Fig.6 과 7은 각각 각각의 열처리 시편에 대한 충격에너지와 그 충격에너지에 대한 초음파 감쇠계수를 나타낸 것이다. 충격 에너지는 QTM재에서 가장 높게 나타났고 QM재가 가장 낮게 나타났다. QM재에서 충격에너지가 가장 낮게 나타난 것은 Quenching을 함으로써 재료의 경도는 증가 하였지만 상대적으로 인성이 저하되었기 때문이라고 사료되며, QTM재에서 가장 높게 나타난 것은 Tempering으로 인하여 Quenching한 재료의 경도는 다소 저하되었지만 상대적으로 인성이 증가하였기 때문이라고 사료된다.

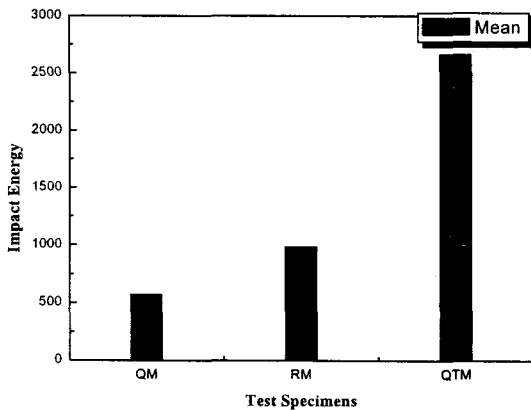


Fig. 6 Charpy Impact Energy for each specimen

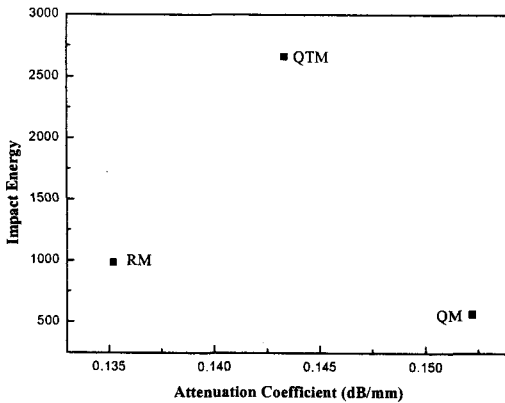


Fig. 7 Effect of Attenuation on Impact Energy

4.4 열처리제조 조건에 따른 감쇠계수의 영향

Fig. 8은 열처리조건에 따른 초음파 감쇠계수의 영향을 나타낸 것이다. QM재가 가장 큰 감쇠계수를 보였으며, 그 다음 QTM, RM의 순으로 작은 값을 보였다. 감쇠계수의 열처리 제조 조건에 따른 의존성은 QM재인 마르텐사이트 조직에서 가장 큰 값을 보였고, 그 다음 템퍼드 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트 순으로 작았다. 이러한 변화로

보아 초음파 감쇠계수에 의한 열처리 제조 조건에 따른 세가지 다른 스프링강의 구별이 가능하며, 미세조직과 감쇠계수와의 사이에는 어떤 관련이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 9은 열처리조건에 따른 초음파 속도(종파)의 영향을 나타낸 것이다. 속도는 RM재가 가장 크며, 그 다음 QTM, QM 순으로 작은 값을 보였다. Fig. 8의 감쇠계수와 비교해보면 역의 관계가 성립하는 것을 알 수 있다.

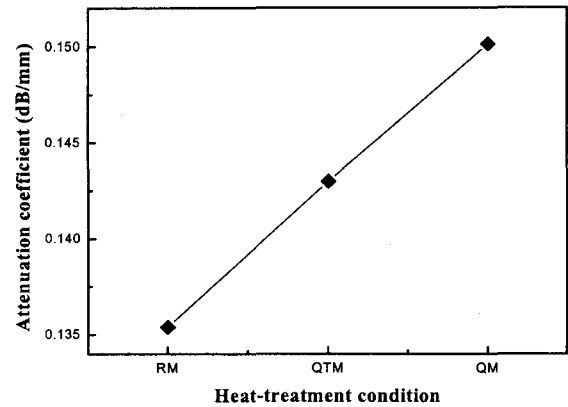


Fig. 8 Effects of attenuation on heat treatment condition

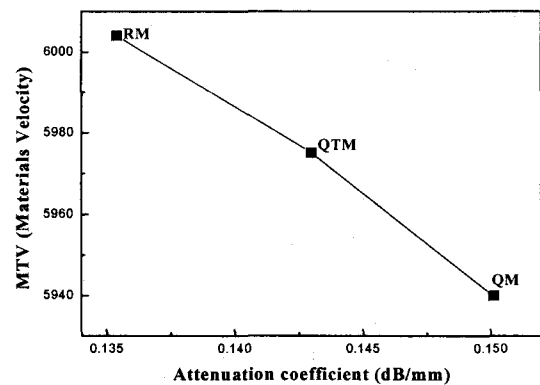


Fig. 9 Effects of velocity on heat treatment condition

4.5 초음파 감쇠계수와 경도와의 상관성

Fig. 10은 초음파 감쇠계수와 경도(HV)와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 초음파 감쇠계수와 경도와의 사이에는 양호한 상관관계가 존재함을 확인하였고, 회귀분석 결과의 실험식은 다음과 같이 표현 될 수 있었다.

$$HV = A + B \alpha_0 \quad (1)$$

여기서, HV는 비커스 경도, α_0 는 감쇠계수(dB/mm)이다.

그리고 상수 A, B는 각각 -3441, 27697의 값을 얻었다.

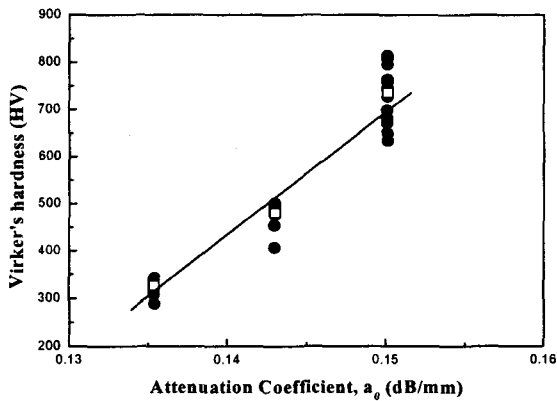


Fig. 10 Relation between attenuation coefficient and Virker's hardness (HV)

5. 결 론

본 연구의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 열처리 제조 조건에 따른 재료의 미세조직과 경도의 변화를 관찰할 수 있었다.
- 2) 감쇠계수의 크기는 퀴칭한 것(QM)이 가장 높았고, 퀴칭후 뜨임한 것(QTM), 그 다음 압연재(RM) 순서로 나타났으며, 감쇠계수에 의하여 3종류의 재료를 구별할 수 있었다.
- 3) 열처리 조건에 따른 충격에너지는 QM, RM, QTM재 순서로 점차 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었으며, 경도와 감쇠계수가 상대적으로 높은 QM재가 가장 충격에너지가 적었으며, QTM재의 경우가 충격에너지가 가장 큰 것으로 나타났다.
- 4) 초음파 감쇠계수와 미세조직 및 경도와는 어떤 관계가 있음이 확인되었고, 경도와 초음파 감쇠계수 사이에는 다음과 같은 양호한 상관관계가 있었다.

참 고 문 헌

- Bray, D. E., Pathak, N. and Srinivasan, M. N., "Residual Stress Mapping in a Steam Turbin Disk Using the LCR Ultrasonic Technique", *Material Evaluation*, Vol. 54, NO. 6, pp. 832-839, 1996
- Wulpi, D. J., "Understanding How Materials Fail", ASM, Metals Park, 1985
- Bray, D. E., and Stanley, R. K., "Nondestructive Evaluation", McGraw-Hill, New York, 1996
- 김선진, 전창환, Bray, D. E., LCR법에 의한 알루미늄 판의 잔류응력평가", 한국 동력기계공학회 춘계학술대회논문집, pp. 136-141, 2000

W. N. Reynolds and R. L. Smith., "The Analysis of Ultrasonic Wave Attenuation Spectra in Metals"

Soon Taik Hong, Soon In Kwun, Wung Yong Choo., "Non-destructive Evaluation of Macrostructure in Low Carbon Steel by Measurement of Ultrasonic Attenuation"

Frank Babick, F. Hinze Siegfried Ripperger., "Dependence of ultrasonic attenuation on the material properties"

journal of the Korean Society for Nondestructive Testing Vol. 21, NO. 1 (2001. 2) "Fatigue Damage Evaluation of Cr-Mo Steel With In-Situ Ultrasonic Surface Wave Assessment"

journal of the Korean Nuclear Society Vol. 19. NO. 1, March 1987 "Evaluation of Fracture Toughness Pressure Vessel Steel Using Charpy Impact Test Specimens."

ASTM E23-01 "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials"