

램파를 이용한 2.25Cr-1Mo재의 열화평가에 관한 연구

A Study on Degradation Estimation of 2.25Cr-1Mo Steel Using Ultrasonic Lamb Wave

이상용*, 박익근*, 박은수*, 권숙인**, 조운호***, 윤승현***

*서울산업대학교 생산정보대학, **고려대학교 재료금속공학부, ***인제대학교 기계 & 자동차공학부

Ik Keun Park*, Un Su Park*, Sang Young Lee*, Sook In Kwun**,
Youn Ho Cho*** and Seung Hyun Yoon***

Abstract

The destructive method is reliable and widely used for the estimation of material degradation but, it have time-consuming and a great difficulty in preparing specimens from in-service industrial facilities. Therefore, the estimation of degraded structural materials by nondestructive evaluation is strongly desired. In this paper, the use of guided wave was suggested for the evaluation of thermally damaged 2.25 Cr-1Mo steel as an alternative way to compensate for limitations of fracture tests. The observation of microstructure variations of the material including carbide precipitation increase and spheroidization near grain boundary was conducted and the correlation with the guided wave features such as energy loss ratio and group velocity changes was investigated. Through this study, the feasibility of ultrasonic guided wave evaluation for thermally damaged materials was explored.

Keywords : degradation, ultrasonic guided wave, dispersion curve, phase velocity, group velocity, energy loss ratio

1. 서 론

재료특성 평가 분야에서 판파(plate wave) 또는, 유도초음파(ultrasonic guided wave)라고도 불리는 램파(Lamb wave)는 기존의 벌크(bulk)파인 종파(longitudinal wave) 횡파(shear wave)에 비해 상대적으로 효율성과 결합검출 민감도가 뛰어난 새로운 형태의 초음파로서 박판의 내부 개재물 탐상에 광범위하게 적용되고 있다. 박판이나 판 구조물내에서의 램파는 주파수, 구조물의 두께, 입사각도에 따라 서로 다른 입자 움직임을 갖는 다양한 모드가 존재하며, 그 진행방향이 구조물의 길이 방향으로 유도되는 특성을 갖고 있다[1,2].

판재 내에서의 램파 산란문제는 입사모드, 주파수, 판재두께, 반사체의 형태에 따라 상이한 모드 전이 현상을 나타낼 수 있다. 이는 판재 형상의 변화가 특정의 입사모드와 주파수 하에서 다양한 산란양상을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 분산선도상의 각 모드는 같은 형상의 판재에 대해서도 서로 다른 모드 전이현상을 나타내

게 되며 판재의 특정 형상에 대한 램파의 모드 전이와 최적입사 모드가 수치해석적으로 예측될 수 있다면 효과적이고 신뢰성 높은 재료평가가 가능하다. 그러므로 다양한 판재 형상 변화에 대한 램파의 산란은 많은 탄성파 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다[3-5].

본 연구에서는 램파의 분산선도[6]에 나타난 파형 구조로부터 램파의 각종 모드특성을 예측하고, 2.25Cr-1Mo강을 장시간 등온열처리로 모의 열화 시험편을 제작하여 탄화물의 석출 및 조대화, 불순물의 입계편석 등 금속학적 미세조직을 관찰하고, 미세조직의 변화와 램파의 전파특성(감쇠계수, 군속도, 모드 별 에너지 변화)과의 상관관계를 규명함으로써 재료의 열화도를 고찰하고자 한다.

2. 관련이론

2.1.1. 램파의 분산성

Fig. 1은 초음파를 재료 내부로 적절한 각도로 입사시킬 경우, 박판 내·외벽으로부터 반사된, 여러 종파 및 횡파형 초음파의 상호 간섭에 의해 램파가 발생되어 박판의 내·

외면에 평행하게 길이방향으로 진행됨을 보여주고 있다.

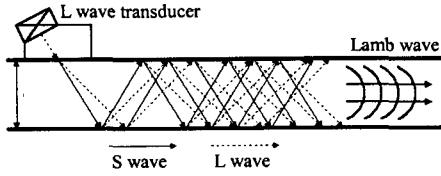


Fig. 1 Oblique incidence method for the generation of Lamb wave

강과 같은 등방성, 균질의 매질에서도 램파는 사실상 분산하게 되는데 이러한 파형을 해석하기 위해서는 위상속도와 군속도의 개념을 도입해야만 한다. 유도초음파를 이용하기 위해서는 ω 와 k 의 함수인 위상속도를 결정해야만 하는데 이것은 다음의 식과 같이 차수가 없는 형태로 간단히 쓸 수 있다.

$$\frac{\tan \beta h}{\tan \alpha h} = \frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad (\text{대칭}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\tan \beta h}{\tan \alpha h} = \frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \quad (\text{비대칭}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

$$\alpha^2 = \frac{w^2}{c_1^2} - k^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta^2 = \frac{w^2}{c_2^2} - k^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

2.1.2. 위상속도와 군속도

Fig. 2와 Fig. 3은 강(steel)의 분산 곡선을 보여주고 있다. 여기에서 종속도와 횡속도는 각각 $c_f=5900\text{m/s}$, $c_t=3230\text{ m/s}$ 로 측정된다. 대칭모드는 S_0, S_1, S_2 이고 비대칭모드는 A_0, A_1, A_2 이며, $f \cdot d$ 가 증가함에 따라 모드의 발생이 증가하며, 동일한 위상속도로 접근하려는 경향이 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 모든 $f \cdot d$ 에 대해서 적어도 두 모드가 존재하는 것을 알 수 있다. 모드의 수는 $f \cdot d$ 값이 증가함에 따라 증가한다.

시험체의 각 형상에 따라서 램파의 모드는 위상속도(phase velocity)로부터 정의된다. 얇은 판 등에 있어 램파의 위상속도는 무차원형태로 특성방정식의 수치해로 계산할 수 있다.

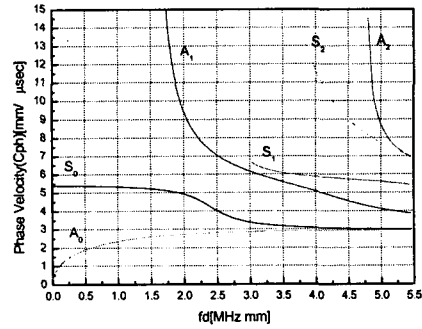


Fig. 2 Dispersion curve for steel(phase velocity)

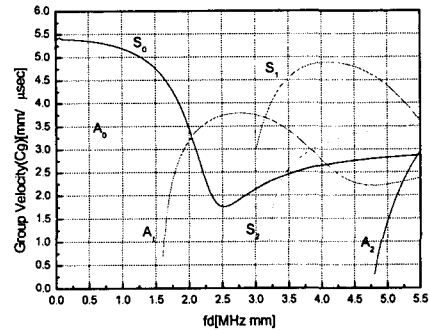


Fig. 3 Dispersion curve for steel(group velocity)

램파의 발생을 위해 초음파 펄스가 사용되었을 때 군속도(group velocity)가 측정된다. 군속도는 아래의 식 이용함으로써 위상속도로부터 계산된다[6-7].

$$c_g = c_{ph} \left[1 - \frac{1}{1 - (f \cdot d) \frac{dc_{ph}}{d(f \cdot d)}} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

웨지(wedge)의 입사각은 플라스틱 웨지의 종파속도, 시험편 두께 및 탐촉자 주파수에 대한 위상속도로부터 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해 계산된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 모의 열화 시험편 제작

실험에 사용된 시험편 재료는 터빈로터용 소재로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo 강으로 900℃에서 1시간 균질화(normalizing)처리 후 720℃에서 1시간 템퍼(temping)처리한 포항제철의 합금을 사용하였으며, 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 열화시키기 위해

시료를 인위적으로 일반 사용온도(약 538°C)보다 높고 재결정온도보다 낮은 630°C의 온도에서 15단계로 고온 열처리를 통한 가속열처리를 수행함으로써 고온 장기 사용재의 미세조직 변화를 시뮬레이션하였다. Table 2는 철의 자기확산식에 의한 열화시간의 예이다[8].

3.2. 초음파 시험편 제작

시험편은 크기가 90×24×2.4mm인 직육면체로써, 그 표면을 #800~#1500의 연마지를 사용하여 연마처리 후 초음파의 입사시 표면에 대한 영향을 최소화하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Comp. (wt. %)	0.138	0.142	0.46	0.004	0.014	2.27	0.97	Bal.

Table 2 Accelerated aging time at 630°C for equivalent microstructure served at 538°C

Time served at 538°C(hr)	1,500	40,000	120,000	145,000	200,000
Aging time at 630°C(hr)	290	730	2,200	2,700	3700

3.3. 실험방법

3.3.1. 미세조직 관찰

열화 단계에 따른 탄화물의 형태 및 탄화물의 변화 등을 조사하기 위해 2.25Cr-1Mo 강의 소재와 각 단계별 열화재에 대해 가속 열화시간에 따른 미세조직의 변화 과정을 투과 전자현미경(TEM)을 통해서 관찰하였다. 시험편은 acetic acid 100ml + methanol 900ml의 전해액로 -20°C, 3V, flow rate 3의 조건에서 전해 연마하였다. 현미경 조직검사는 표준절차에 준하여 수행하였고, 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

3.3.2. 경도시험

열화에 따른 경도변화를 측정하기 위해 시험편을 #800에서 #1500까지의 수지연마제로 연마한 후, 0.5µm 크기의 알루미나 분말을 이용하여 최종 연마하고 표면 거칠기를 일정하게 하여 표면거칠기에 의한 경도값의 존성을 최소화하였다. 일본 Shimadzu사의 마이크로비커스 경도시험기(micro Vickers hardness tes HMV-2000)를 사용하여 압입점간의 거리가 경도값에 미치는 영향을 배제하기 위해서 압흔의 5배 이상의 충분

한 간격을 두고 경도를 측정하였고, 압입 횟수는 열화 단계별로 각 시험편에 대해 시험편당 10회, 시험하중은 1kg으로 하고 15초 동안의 하중부하 시간으로 측정하였다.

3.3.3. 초음파시험

본 연구에서는 Krautkramer사의 직경 0.5인치인 1MHz 탐촉자 2개와 램파 모드를 발생시키기 위해 입사각 조절이 자유로운 가변각 웨지를 제작하여 실험을 하였다. 반사신호의 증폭을 위하여 Ritec사의 RAM 10000 펄서/리시버를 사용하고, 전파시간 측정을 위해 디지털스토리지오실로스코프(Lecroy 9374M)에 연결하여 사용하였다. 탐촉자에 수신된 초음파 에코 파형은 오실로스코프의 CRT상에 RF-signal로 표시하고, PC를 이용한 데이터획득 시스템을 Fig. 4와 같이 구축하였다.

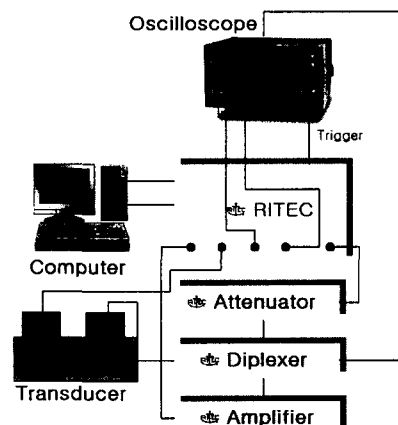


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

램파를 발생시키기 위해서는 여러 가지 방법을 사용할 수 있으나, 적정모드를 선택하여 가진시키기 위해서는 주로 톤버스트 신호(tone burst signal)를 사용한다.

본 실험에서는 고출력 초음파발생기(RAM 10000)를 이용한 톤버스트 시스템을 사용하였는데 이는 짧은 지속시간을 갖는 사인곡선의 신호를 램파 탐촉자에 보내도록 되어져 있다. 이때 지속시간은 µs 단위로 조절이 가능하고, 진동수도 미세하게 조절이 가능하다.

컴퓨터에 연결된 이 톤버스트시스템은 소동 미세조정과 함께 자동적인 주파수 스위핑(sweeping)을 하며 RF 데이터를 획득할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 미세조직 및 경도 변화

2.25Cr-1Mo 강은 적절한 기계적 성질을 부여하기 위해 균질화처리 후 템퍼링 열처리를 하여 사용한다. 본 연구에서 사용된 재료도 동일한 열처리를 한 것이다.

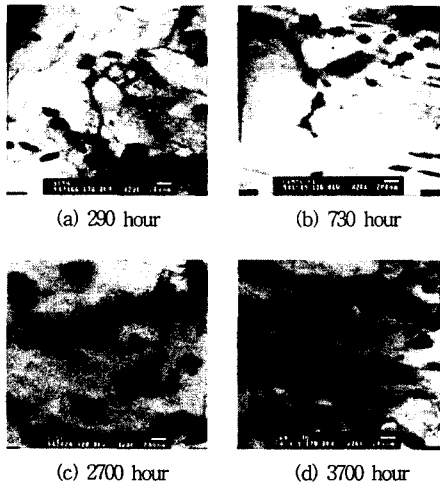


Fig. 5 TEM micrographs showing morphology of carbide

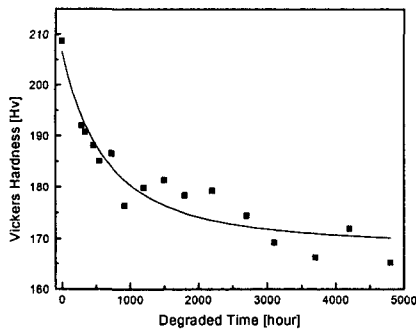


Fig. 6 Change of Vickers hardness with degraded time

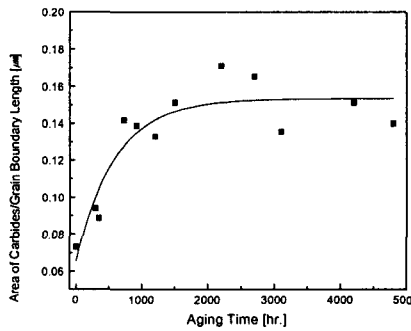


Fig. 7 Change of area on grain boundary carbides per unit grain boundary length

Fig. 5는 열화시간에 따른 탄화물의 변화 양상을 보여주는 투과 전자현미경 사진이다. 열화시간이 증가함에 따라 탄화물이 조대화되며 점차 구상화가 진행되고 있다. 미세한 침상의 탄화물은 점차 수가 줄어들어 1500시간 이후에는 거의 관찰할 수 없었다. 또한 입계 탄화물도 조대화가 되며 점차 합체가 되어가고 있다.

Fig. 6은 열화시간에 대한 경도값의 변화를 나타낸다. 열화시간이 진행될수록 경도값의 저하가 둔화되는 경향을 알 수 있다. 이와 같은 경도값의 변화는 재질 열화 정도와 밀접한 관계가 있으므로, 간접적으로 파괴시험치의 예측은 물론 재질 열화도 평가의 가능성을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 입계에서의 단위 길이당 탄화물의 면적을 나타낸 것이다. 입계 탄화물은 열화시간이 증가함에 따라서 조대화가 되며, 합체되기 때문에 입계 탄화물은 입계의 길이당 탄화물의 면적으로 정량화 하였다. 920시간까지는 열화시간이 증가함에 따라서 탄화물이 차지하는 면적이 증가하며 이후에는 속도가 점차 감소하고 포화되는 경향을 보이고 있다.

4.2. 램파 모드의 감쇠특성

Fig. 8은 열화정도에 따른 램파의 감쇠계수 주파수의존성을 나타내고 있으며, 램파를 이용한 감쇠계수의 주파수의존성은 고주파초음파(중파)를 이용한 감쇠량 측정과는 달리 열화시간에 따른 열화도를 평가할 수 있는 상관관계를 보이지 않으므로 재질열화의 평가가 어려울 것으로 판단된다.

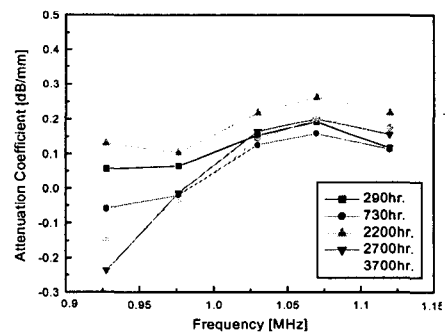


Fig. 8 Attenuation coefficient of A_1 mode measured by Lamb wave

따라서 램파를 이용한 재질열화의 평가를 위해서 램파 특성을 고려한 진폭과 신호의 지속시간(duration)화의 양을 함께 고려한 램파의 에너지의 변화와 열화시간과의 상관관계를 고찰한다.

4.3. 램파 모드별 에너지손실비의 변화

시험편의 열화도를 평가하기 위해 재료 내부로 램파를 적절한 입사각도로 입사시켜야만 한다. 입사각은 가변각 웨지내의 음속을 고려하고, 시험편의 두께와 사용 탐촉자의 주파수에 따라서 분산선도로부터 스넬의 법칙을 이용하여 위상속도를 고려한 최적의 모드를 선택하였다. 램파를 시험체 내부로 진행시킬 경우의 이론치 군속도와 실제 군속도를 Table 4에 나타내고 있다.

Table 4 Theoretical and experimental group velocity

Mode \ Cg	Theory(mm/ μ s)	Experiment(mm/ μ s)
S0 mode	1.8	1.915
A1 mode	3.6	3.724

Fig. 9는 적절한 입사각도(37°)에서 S_0 모드의 RF-signal을 나타내고 있다. 이는 탐촉자를 맞대었을 때(0mm)와 탐촉자를 15.3mm의 거리만큼 위치시켜 pitch-catch법을 이용하여 얻은 RF 신호를 중첩하여 나타내었다.

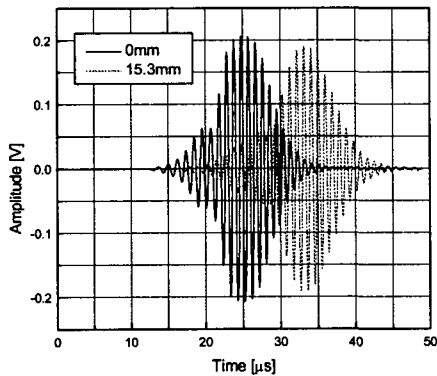


Fig. 9 RF-signal of Lamb wave over the distance (0mm ~ 15.3mm)

Figs. 10과 11은 시험편의 열화시간에 따른 S_0 모드와 A_1 모드 선택 시 각각의 에너지손실비를 보여주고 있다. 여기서, A1은 가변각웨지를 서로 맞대었을 때, A2는 15.3mm 간격을 두었을 때의 에너지이고, (A2/A1)는 탐촉자 거리 변화에 따른 에너지손실비를 나타낸다.

그림의 결과로부터 열화시간에 따라 두 모드의 에너지손실비가 모두 감소함을 알 수 있다. 따라서, 열화도 평가에 램파의 에너지손실비의 변화는 감쇠량 보다 더 민감한 상관성을 갖는 물리적 변수임을 알 수 있다.

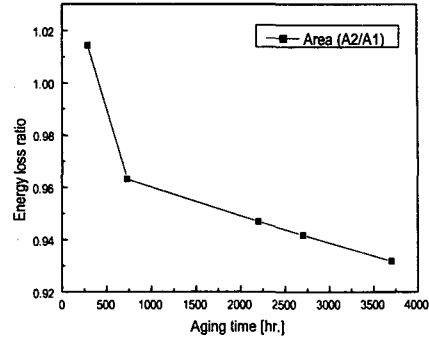


Fig. 10 The variation of S_0 energy loss ratio at $f=1\text{MHz}$ with respect to aging time

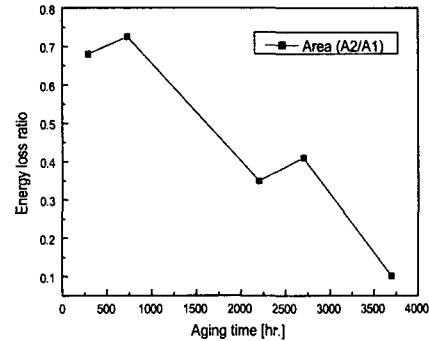


Fig. 11 The variation of A_1 energy loss ratio at $f=1\text{MHz}$ with respect to aging time

4.4. 주파수 변화시 군속도 변화에 따른 시간변화량

Figs. 12와 13은 열화가 적게 된 시편과 열화가 많이 되어진 대표적인 시편을 채취하여, S_0 모드와 A_1 모드의 가진주파수만을 변화시킬 경우, 군속도 변화에 따른 시간변화량을 각각 나타내고 있다.

A_1 모드의 경우 열화 시간이 증가할수록 시간증분의 변화가 미소하나, S_0 모드의 경우 열화시간이 증가할수록 시간변화량이 열화가 적게된 시편보다 증가함을 알 수 있으며, S_0 모드의 경우는 군속도의 약 10% 범위까지 속도 변화가 측정되어 기존의 벌크파 군속도 실험에 비해 매우 우수한 민감도와 재현성을 나타내므로, 보다 신뢰성있는 비파괴적 열화손상 평가법으로서의 가능성을 보여주고 있다. 따라서, 램파를 이용한 열화도 평가 시 물리적 이해에 기초하여 모드와 주파수의 선정이 최적화 될 경우, 기존의 벌크파 평가법의 한계를 보완 할 수 있을것으로 기대된다.

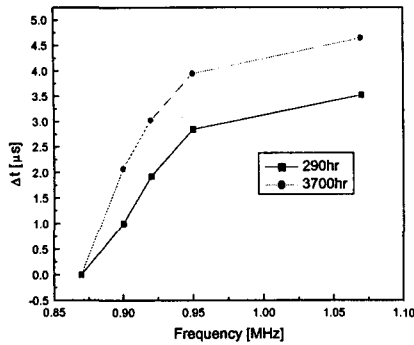


Fig. 12 Time delay of S_0 mode with respect to frequency sweeping over the range of (0.87MHz ~ 1.07MHz)

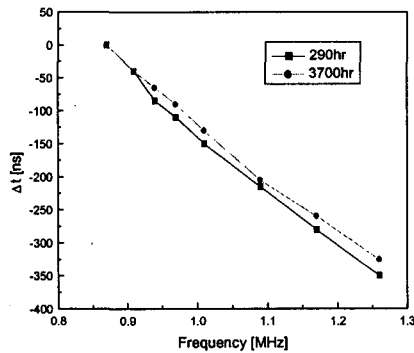


Fig. 13 Time delay of A_1 mode with respect to frequency sweeping over the range of (0.87MHz ~ 1.26MHz)

5. 결 론

2.25Cr-1Mo 강의 모의 경년열화에 따른 미세조직의 변화, 램파의 에너지손실비의 변화, 그리고 균속도변화에 따른 시간변화량을 통한 열화도 평가 가능성을 실험적으로 검증하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 경년열화에 의한 결정립계 부근에서의 탄화석출물 증가 및 구상화로 인한 램파의 에너지손실비와 균속도 변화에 따른 시간변화량이 2.25Cr-1Mo 재료의 열화도 평가의 중요한 물리적 변수임을 확인할 수 있었다.
- (2) S_0 모드의 경우 균속도의 약 10% 범위까지 속도 변화가 측정되어, 램파를 이용한 열화도 평가 시 물리적 이해에 기초하여 모드와 주파수의 선정이 최적화 될 경우, 기존의 벌크파 평가법의 한계를 보완 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(과제번호 1999-2-301-009-3) 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Lamb, "The flexure of an elastic plate," Proc Math. Soc., pp. 85-90, Dec. (1989)
- [2] Joseph L. Rose, "Ultrasonic wave in solid m Cambridge, (1999)
- [3] D. C. Worlton, "Experimental confirmation of waves at megacycle frequencies," Am. Inst. Phys. 32, No. 6, pp. 967-971, June, (1916)
- [4] Younho Cho, Derrick D. Hongerholt, and Joseph Rose, "Lamb wave Scattering Analysis for Refl Characterization," IEEE Trans. Ultrasonic., Ferr Cont., Vol. 44, No. 1, pp. 44-52, January, (1997)
- [5] I. N. Komsky and J. d. Achenbach, "Application self-calibrating ultrasonic technique to the det fatigue cracks by the use of Lamb waves," Review Progress in Quantitative Nondestructive Evaluatio 12B, pp. 2617-2174, (1993)
- [6] D. C. Gazis, "Three-Dimensional Investigation Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinder Analytical Foundation," The Journal of the Acou Society of America, Vol. 31, No. 5, pp. 568-(1959)
- [7] S. I. Rokhlin, "Interaction of Lamb Waves Elongated Delaminations in Thin Sheets" Interna Advances in Nondestructive Testing, Vol. 6, 263-285, (1979)
- [8] Abdel-Latif, A. M., Cobett, J. M., Sidey, D. and D.M.R.M, "Effects of Microstructural Degradatio Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," Proc. Int. Conf. on Fracture (ICF5), Cannes, France, V pp. 1613-1620, (1981)