

LCR 파를 이용한 압연 알루미늄판의 잔류응력 평가에 관한 연구

김선진 · 전창환
부경대학교 기계공학부

A Study on Evaluation of Residual Stresses for Rolled Aluminum Plate Using the Critically Refracted Longitudinal(LCR) Wave

SEON-JIN KIM AND CHANG-HWAN JEON

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Ultrasonic evaluation 초음파 평가, Residual stress 잔류응력, Aluminum plate 알루미늄판, Travel time 이동시간, Analysis of variance 분산분석

ABSTRACT: Ultrasonic travel-times obtained with the LCR ultrasonic technique have shown an ability to distinguish among three aluminum plates. The 244×150mm plates are 12mm thick, but differ in heat treatment. One is fully annealed, the second is quenched and then tempered, and the third is heat-treated to T651 plate, as received plate. Travel-times were obtained at four locations on each side of all plates. The data for both sides of each plate clearly are in very close agreement except location 1 of each plate. In order to show the travel-time variation throughout the plate areas, the average travel-time for both sides of each plate were calculated. For Plate 1, the travel-time data were the highest and the data of Plate 2 were upper than Plate 3. Finally, the residual stresses for each plate were measured by X-ray diffraction method. The results showed a good relation. These preliminary results indicate that the LCR Ultrasonic Technique may be not only further developed for use in quality control in the manufacture of rolled aluminum plates but also industry.

1. 서 론

잔류응력(residual stress)은 외력이 제거된 상태에서 재료 내부에 존재하는 응력으로서 압연판의 제조과정 중의 열처리나 용접, 쇼트 피이닝(shot peening) 등 기계적인 가공 작업에 의하여 재료의 내부에 존재하게 된다. 기계적인 작업조건에 따라서는 상당히 큰 인장잔류응력이나 압축잔류응력이 존재하게 되는데, 이러한 잔류응력들은 부재의 수명이나 파손 등에 중요한 영향을 미친다(Bray and Stanley, 1997; Wulpi, 1985).

공학적인 구조물의 파괴에 중요한 모드의 피로파괴와 응력부식파괴 등은 표면에 민감한 현상이므로 표면근처의 잔류응력이 적절하게 평가되어야 한다. 파괴역학의 관점에서 보면 구조물의 내부 응력을 알아야 하지만 정확한 응력의 형태를 아는 것으로도 균열이 진전될 것인가 아닌가를 평가하는데 도움을 줄 수 있다. 따라서 기계적 요소나 구조물의 파괴와 피로수명, 취성파괴, 응력부식균열에 상당한 영향을 미치는 잔류응력 문제를 해결하기 위해서는 잔류응력을 측정하여, 잔류응력의 크기나 분포상황을 파악하여, 이를 최소한의 크기로 이완 시켜주거나 적절한 대응을 강구하는 것은 공학적으로 중요한 의의를 갖는다고 할 수 있다.

이러한 잔류응력을 측정하기 위한 방법으로는 기계적인 법,

홀 드릴링 법, X-선 회절법, 자기적 방법, 초음파 법 등이 이용되고 있으며, 각각의 방법들은 측정방법별 특성에 따라 장단점을 내포하고 있다(Parlane, 1977).

Hole Drilling 법은 구조물, 재료 등의 재질이나 형상, 치수에 변화를 줘서 설비의 일부분을 교체해야 하기 때문에 많은 경제적 손실을 초래한다. 따라서 파괴하거나 해체하지 않고 현장에서 직접 잔류응력을 측정하고 평가하는 비파괴 평가법은 시간적, 경제적인 절감효과를 획득할 수 있다. 방사선 투과시험은 재료표면에서 결정학적인 면들 사이의 공간에서 응력이 감소한 변화를 측정한다. 이 방법은 비교적 정확하게 잔류응력을 측정하고 기록, 보존할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 아주 큰 설비와 안전성 등의 문제 때문에 현장에서 직접 사용하기에는 적합하지 않다. Barkhausen noise 해석 또한 응력 측정을 위해 효과적이지만, 방사선 투과시험처럼 표면 응력 해석에는 어려움이 있다. 또한 강자성 재료에만 사용할 수 있다. 하지만 초음파 법을 이용하면 설비가 간단해지고 운용이 안전하여 현장에서의 측정에 아주 용이하다. 초음파법의 우수성은 재료의 내부로 주사되어 응력 측정이 가능한 것이고 관찰되는 물리적 현상은 음향탄성계수(acoustoelastic constants)에 기초하고 있다(Egle and Bray, 1976). Bray 등(Egle, 1979; Bray et al., 1999; 김 등, 2000)은 LCR 초음파 기법을 이용하여 재료의 잔류응력을 평가하는 실험을 행하여

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T651 (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.08	0.29	1.7	0.04	2.6	0.19	5.8	0.02

Table 2 Mechanical properties of Al 7075-T651

Tensile strength (kgf/mm ²)	Endurance limit (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
57	48	10	117

LCR파가 재료 내부의 잔류응력 변화에 민감하다고 보고하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 현재 항공기, 철도차량용 재료로서 널리 사용되고 있는 Al 7075-T651 압연판을 사용하여 열처리를 행하여 모의 시험편을 제작하여 금속학적 미세조직을 관찰하고, 미세조직의 변화와 경도 그리고 LCR 파의 상관관계를 고찰하고자 한다. 또한, X-선 회절법을 이용하여 모의 시험편에 대한 잔류응력을 구하여 LCR파의 특성과 비교 고찰하여 표면 근방의 잔류응력 평가에 대한 비파괴 평가의 가능성을 검토하고자 한다.

2. LCR 초음파 기법의 특징

종파가 제1임계각보다 크거나 같은 각으로 굴절하더라도 완전히 사라지지 않고 표면 가까이에 집중하여 표면을 따라 빠른 속도로 이동하는데, 이것을 LCR파라고 한다. LCR파는 재료의 표면 바로 아래로 이동하는 bulk 파이기 때문에 단지 표면에서 뿐만 아니고 내부의 응력장에 민감하다. LCR파는 응력에 아주 민감하지만 재료의 조직에 대해서는 영향을 많이 받지 않는다(Basatskaya and Ermolov, 1980).

Fig. 1은 LCR파를 발생시키는 probe를 나타낸 것으로 아크릴 재(Poly Methyl Methacrylate (PMMA)) 쐐기의 종파속도가 2730m/s이고 알루미늄 판의 종파속도가 6013m/s일 때, 입사각을 27°로 가공하면 Snell's law에 따라 제 1임계각에 가까운 LCR파를 발생시킬 수 있다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 종파가 27°의 입사각으로 아크릴 쐐기를 통해 알루미늄 판 내부로 입사하면 횡파는 약 34°로 굴절하고, 종파는 제 1임계각에 상응하는 90°의 굴절각으로 표면 바로 아래로 투과하여 표면을 따라 전파하게 된다(Bray et al., 1999).

3. 실험장치 및 방법

3.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 항공기, 철도차량용 소재로 널리 사용되는 국산 Al-Zn-Mg계 알루미늄 합금인 Al7075-T651 압연판으로 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

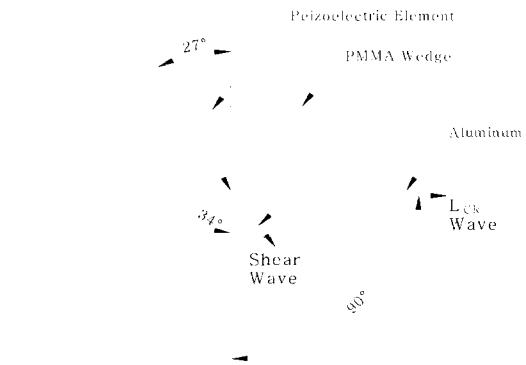


Fig. 1 Principle of LCR wave

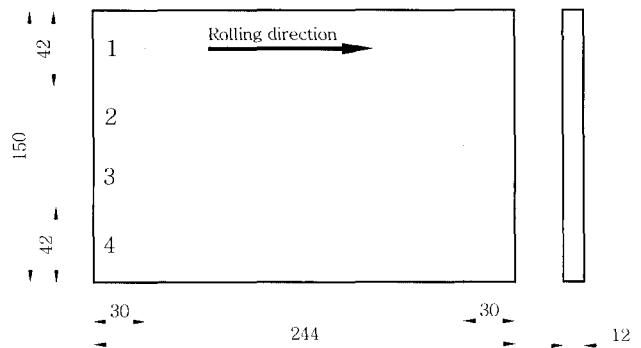


Fig. 2 Shape and dimension of specimen (unit : mm)

Table 3 Descriptions of the 12mm thick three aluminum plates

Plate	Identifying Marks	Description
1	Al 7075-T651, FA	Fully Annealed
2	Al 7075-T651, QT	Quenched and then Tempered
3	Al 7075-T651, R	As Received

시험편은 시판되는 12mm 두께의 Al 7075-T651 압연판을 244×150mm로 절단하여, 잔류응력의 변화를 주기 위하여 열처리 조건을 달리한 세 개의 모의 알루미늄 시험편을 제작하였다. Table 3은 본 실험에서 사용된 열처리 조건과 시험편 기호를 나타낸다.

Fig. 2는 본 연구에 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 압연방향에 대하여 평행한 방향으로 LCR 파의 travel-time을 측정하였다. 정해진 위치에서 travel-time을 측정하기 위하여 알루미늄 판 위에 1, 2, 3, 4로 위치를 정하고 probe가 놓여질 위치를 +표시로 stencil 하였다. 그리고 시험편의 앞면을 A, 뒷면을 B로 정하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 열처리 조건

열처리 조건을 다르게 한 시험편에 대한 travel-time의 변화를

측정하기 위해 Plate 1은 full annealing 하였다. 410°C에서 1시간 가량 유지시킨 후, 250°C정도까지 20°C/hr 정도의 속도로 노 안에서 냉각하고, 그 후에는 노 밖에서 공냉하였다. Plate 2의 경우는 490°C에서 1시간 정도 유지한 후 quenching(수냉)하였다. Quenching이 끝난 후 120°C에서 24시간 tempering을 행한 후, 공냉하였다. Plate 3은 석출강화(precipitation strengthening)된 시판 재료 그대로를 사용한 것이다.

3.2.2 경도시험과 미세조직 관찰

알루미늄 판의 열처리 조건에 따른 경도변화와 미세조직 등의 변화를 비교하기 위하여, Plate 1, 2 그리고 3에서 각각 시편을 채취하여, 경면을 만들고, 결정입계와 미세조직을 검출할 수 있는 Keller의 부식액에 약 15초 정도 부식시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척한 후 건조시켜 광학현미경의 배율을 200배로 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.

3.2.3 LCR법에 의한 travel-time 측정

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도는 Fig. 3과 같이 pulse를 발생시키고 수신할 수 있는 초음파 탐상기(KrautKramer USD15)와 알루미늄 판 내부를 통하여 이동한 LCR파 신호를 RF 파형으로 변환하여 travel-time을 분석할 수 있는 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A 400MHz)를 사용하여, 2탐촉자를 이용하여 travel-time을 측정하였다. 실험에 사용한 탐촉자는 Panametrics사의 지름이 10mm이고 공진 주파수가 5MHz인 probe를 사용하였다. 접촉매질은 Krautkramer사의 ZG-4를 사용하고, 3kg의 일정 하중을 주는 압착 지그를 사용하여 측정하였다. Travel-time data는 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 알루미늄 판 위에 표시된 부분에서 압연방향과 평행한 방향으로 하여 측정하였다. Travel-time data의 신뢰성을 위해 각 Plate의 A와 B 양면의 location 1, 2, 3, 4에서 일정 하중을 부가하여 예코가 안정이 된 후에 10회 반복 측정하여 기록하였다.

Fig. 4에서와 같이 LCR파를 발생하는 sender probe와 그것을 검출하는 receiver probe를 일정한 간격(125mm)하여 travel-time을 측정하였다.

LCR법에 의한 대부분의 실험은 일축 응력장이라 가정하였다 (Bray et al., 1999).

3.2.4 잔류응력 측정

금속재료는 작은 결정체의 집합체이며, 각 결정체는 공간상에서 조직적으로 배열된 원자들로 구성되어 있다. 그러나 각각의 결정체는 불규칙한 방향을 가지고 있어 재료에 응력이 가해지면 그 재료의 탄성한계 이내에서 응력의 크기에 비례하여 결정의 원자간 거리가 균일하게 멀어지던가 혹은 줄어들게 된다.

X-선 회절을 이용한 응력 측정은 금속 결정체 표면에 X-선을 조사하여 Bragg 법칙(Bragg's law)에 따라 회절되어 나오는 X-선의 강도를 측정함으로써 재료내부의 응력(잔류응력)을 측정하는 방법이다. 잔류응력은 외력을 제거하였을 때 재료 내부에 남아 있는 응력으로써 재료의 격자면 간격을 측정하여 구하는 것이

며, 격자면 간격이 힘을 가한 방향으로 무응력 상태일 때보다 늘어나 있으면 인장잔류응력(tensile residual stress), 반대로 줄어들었다면 압축잔류응력(compressive residual stress)이 된다.

본 알루미늄 시험편에 대한 잔류응력의 측정은 상술의 X-선 회절법(X-ray diffraction)을 이용하였으며, X-선 잔류응력 측정기는 RIGAKU-MSF 2M을 사용하였다. 본 실험에 대한 측정조건은 Table 4와 같다.

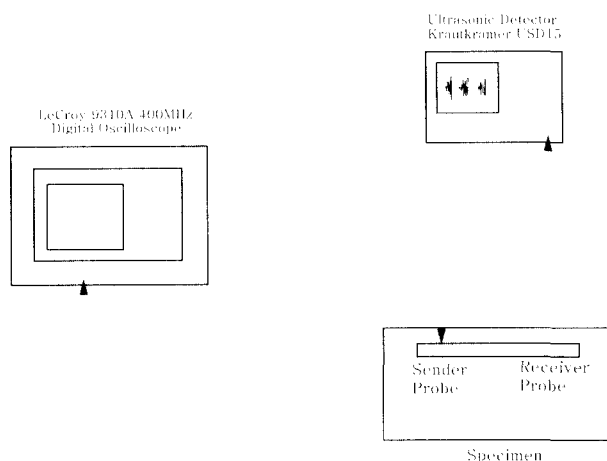


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

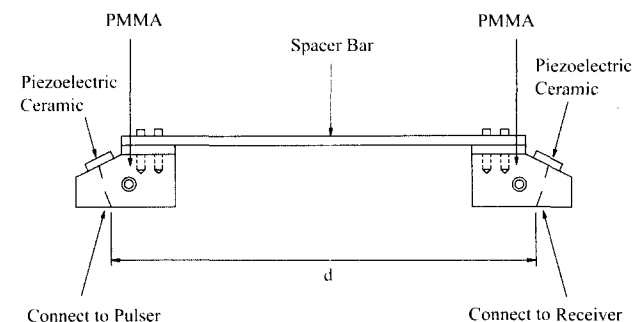


Fig. 4 Typical LCR probe arrangement

Table 4 Measuring conditions of residual stress

X-ray diffraction	condition	
	Target Tube Voltage Tube Current	Cr 30kV 10mA
2θ	140°C ~ 170°C	
ψ	-15° ~ +50°	
Counter	Scintillation	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열처리에 따른 미세조직 및 경도의 변화

Fig. 5는 열처리 조건에 따른 미세조직을 광학현미경(Optical Microscope)을 통해 200배율로 관찰한 것이다. (a)는 Plate 1의 경우로 Full annealing으로 인하여 결정립이 균질화되고 미세화된 것을 알 수 있다. (b)는 Plate 2의 경우로 quenching(수냉)한 후 tempering 한 조직으로 결정립은 미세하지만 Plate 1보다 불균질하게 보이고 석출물이 다소 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. Tempering으로 인하여 시효경화되고 조직이 안정화된 것으로 보인다. (c)는 Plate 3의 경우로 결정립이 압연 방향으로 길게 늘어나 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 열처리에 의한 변형 중에는 금속내의 결정립들이 변화하면서 미세구조가 다르게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 조직의 변화는 초음파 특성의 변동에 영향을 준다는 보고가 있다(Thompson *et al.*, 1984).

Fig. 6은 각 Plate에 대한 비커스 경도값(HV)의 변화를 나타낸 것이다. Plate 1이 가장 낮은 경도값을 보이고 있다. 이는 Full annealing 열처리로 인하여 재료가 연화되었기 때문에 경도가 제일 낮은 것으로 생각된다. 두 번째로 Plate 2의 경도가 높았으나 Plate 3과 그리 큰 차이는 보이지 않았다. Quenching(수냉)한 후 tempering 한 열처리로 인하여 재료가 시효경화 되어 경도가 다소 높게 나타난 것으로 보인다. 본 실험의 경우 Plate 3의 경도가 가장 높았다. 이는 시판 그대로의 알루미늄 판으로, 압연과 시효경화로 경도가 높아지고 조직이 안정화 된 것으로 생각된다.

이상의 열처리에 따른 미세조직이나 경도의 변화는 LCR파의 신호에 영향을 미치는 변수로 작용할 것으로 사료된다.

4.2 LCR파의 전파 특성

알루미늄 판에 미치는 LCR 파의 전파특성을 평가하기 위하여 Plate 1, 2, 3에 대한 LCR 파의 travel-time(TT) 측정하였다.

Fig. 7은 알루미늄 판을 투과하여 초기 펄스 다음으로 제일 먼저 도착하는 LCR파의 전체 signal을 나타낸 것이다. 비교적 정확

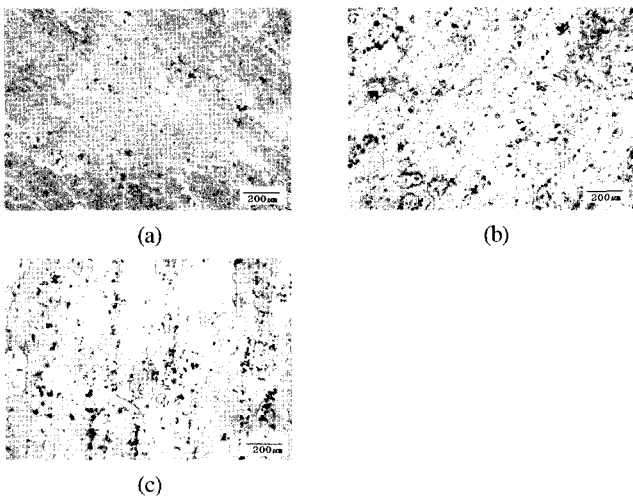


Fig. 5 Microstructure of plates (magnified 200×)

한 travel-time data를 얻기 위하여 디지털 오실로스코프 상에서 시간을 아주 작게 나누고, Fig. 8에서 보는 것처럼 두 번째 사이클의 0에 가장 가까운 양의 횡단면을 기준으로 하여 측정하였다. 이러한 방법으로 측정된 travel-time의 결과를 Fig. 9, 10 및 11에 나타내었다. Data는 각 Plate의 A와 B 면의 location 1, 2, 3, 4에서 10회 반복 측정된 travel-time의 평균을 나타낸 것이다. Fig. 9는 Plate 1에 대한 것으로 location 1을 제외하고는 A면간, B면간 사이에는 그리 큰 scatter를 보이지 않고, A면과 B면과의 사이도 약간의 차이만 보였다. Fig. 10은 Plate 2의 경우로, Plate 1의 경우와 마찬가지로 location 1을 제외하고는 A면간, B면간과 A면과 B면 사이에도 약간의 변동만 나타났다. 담금질한 후의 증가한 응력이 뜨임으로 인하여 다소 감소한 것으로 생각된다. Fig. 11은 Plate 3의 경우로, Plate 1과 Plate 2의 결과와 마찬가지로 location 1을 제외하고는 거의 동일한 양상을 나타내고 있다.

모든 시험편의 경우에 Location 1에서 A면과 B면 사이에는 다소 큰 travel-time의 변동을 보이는데, 이는 원재료인 알루미늄 압연판의 압연 과정 중에 앞면과 뒷면의 하중 차이나 왜곡의 가능성으로 인한 것, 커팅에 의한 영향 및 측정시의 오차도 무시할 수 없다고 생각된다.

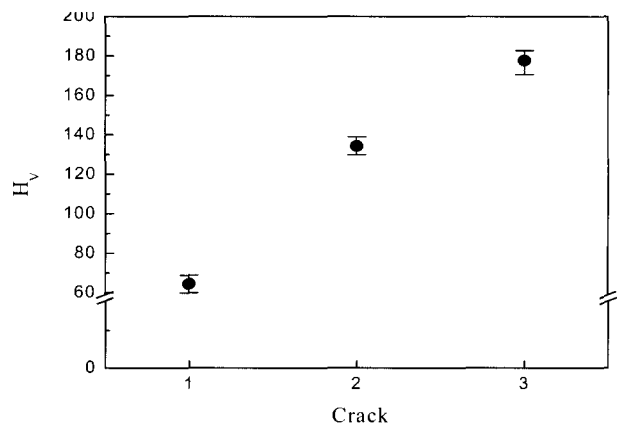


Fig. 6 Virker's hardness for each aluminum plate

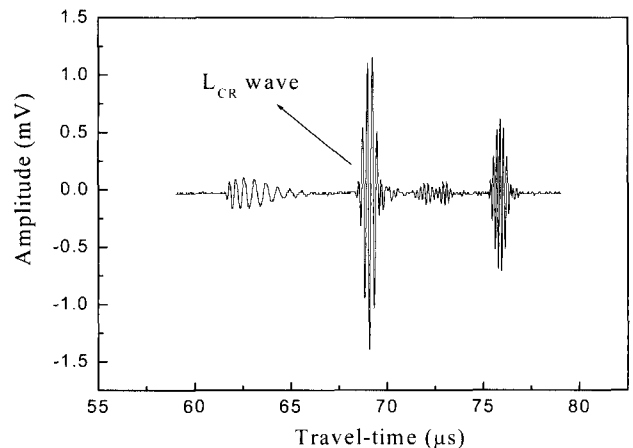


Fig. 7 Complete LCR wave form of the travel-time for location 4 of Plate 1A (Time base 2 μs/div, delay 59.0 μs, 50mV/div.)

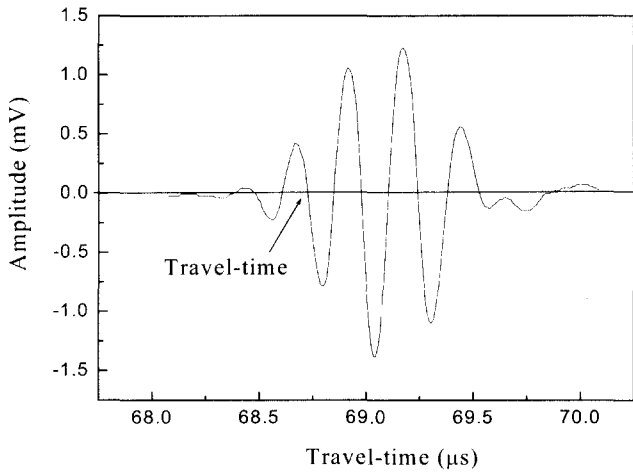


Fig. 8 LCR wave form of travel-time for location 4 of Plate 1A (Time base $0.1 \mu s/div$, delay $68.7 \mu s$, $50mV/div$.)

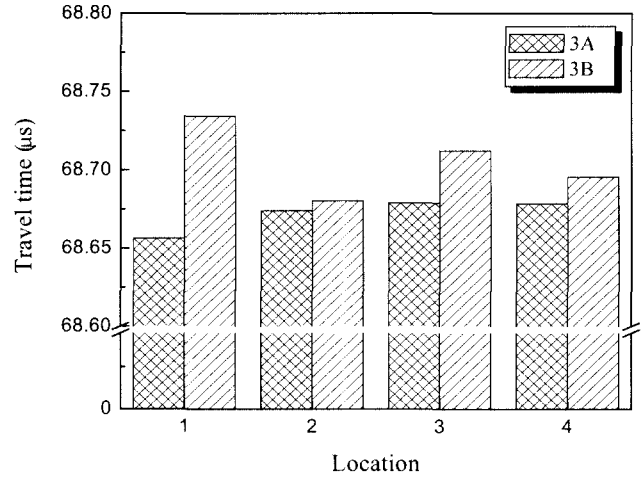


Fig. 11 Travel-times(μs) for Plate 3

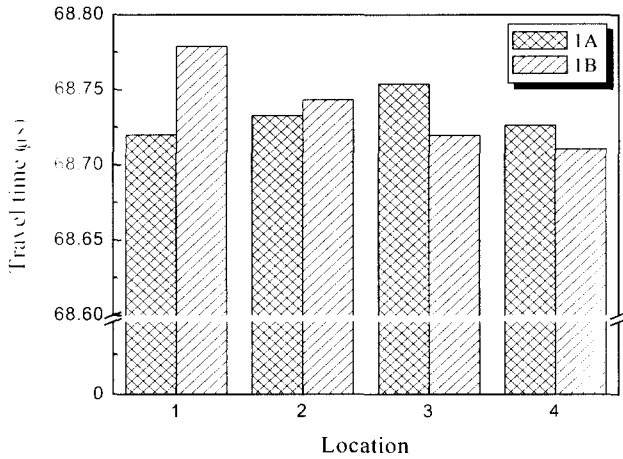


Fig. 9 Travel-times(μs) for Plate 1

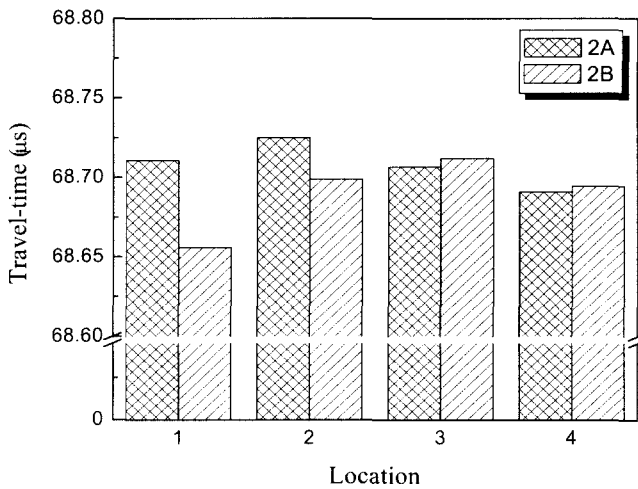


Fig. 10 Travel-times(μs) for Plate 2

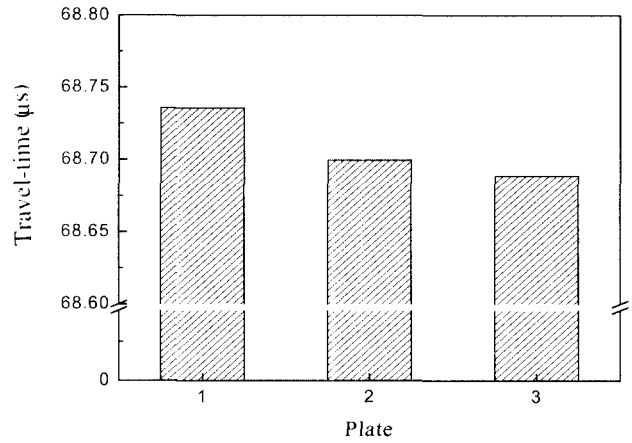


Fig. 12 Average travel-time(μs) for both sides of each plate

Plate 1, 2, 3에서의 A, B 양면에 대한 평균 travel-time의 변동을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, Plate 1의 경우가 가장 큰 travel-time을 보였고, 그 다음 Plate 2, Plate 3의 순으로 travel-time이 작음을 알 수 있다. 본 실험의 경우, Fig.6의 경도와 travel-time을 비교하면 경도가 낮을수록 travel-time이 미소하게 증가하는 경향임을 알 수 있다. 이것은 알루미늄 내부의 잔류응력과 조직이 LCR파의 travel-time에 영향을 미치기 때문이라 사료된다. 이러한 결과로부터 LCR파의 초음파기법을 이용하여 서로 다른 알루미늄 판을 구별할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 데이터의 통계적 해석

LCR파를 이용하여 열처리 조건이 다른 세 개의 알루미늄 판에서 측정된 travel-time의 결과가 통계적으로 유의한 차이가 있는지 없는지를 고찰하기 위하여 분산분석(ANOVA)을 행하여 검토하였다(Milton and Arnold, 1986). Table 5는 LCR파를 이용하여 세 개의 알루미늄 판에서 측정된 travel-time의 결과를 나타낸다. F값 9.523은 유의수준 0.05에서 F값 3.47과 유의수준 0.01에서

Table 5 Single factor ANOVA of average travel-time for location of each Plate ($\alpha=0.05, 0.01$)

	SS	df	MS	F	$F_{\alpha=0.05}$	$F_{\alpha=0.01}$
Between Groups	0.009659	2	0.004828	9.523	3.47	5.78
Within Groups	0.001656	21	0.000507			

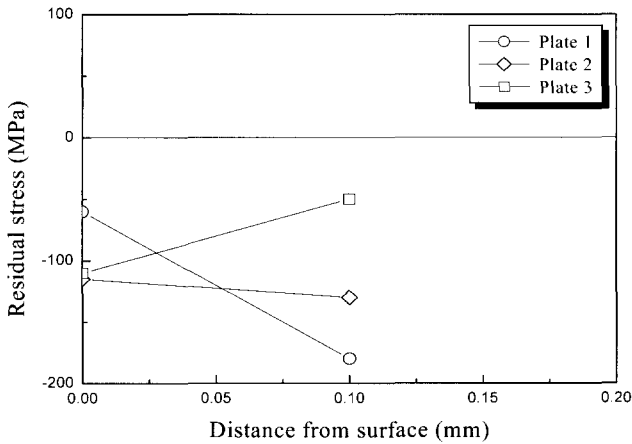


Fig. 13 Residual stress distributions of each plate

F값 5.78을 훨씬 초과하므로 귀무가설(H0)을 기각하고 대립가설을 수락한다. 따라서, LCR파를 이용하여 열처리 조건이 다른 Plate 1, 2, 3으로부터 얻은 travel-time data의 결과는 5%와 1%의 유의 수준에서 통계적으로 유의함이 판명되었다.

4.4 모의 시험편의 잔류응력

모의 시험편 Plate 1, 2 및 3에 대하여 각 plate의 location 1부분에서 채취한 시험편에 대하여 전면 4개소에 대하여 X-선 회절법으로 측정된 결과의 평균치를 Fig. 13에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 plate에 대하여 평균적으로 압축잔류응력이 존재함을 알 수 있다. 시험편의 바로 표면에서는 Plate 1, Plate 3, Plate 2의 순으로 큰 잔류응력을 얻었다. 그리고 표면으로부터 0.1mm 깊이에 대한 잔류응력은 Plate 3, Plate 2, Plate 1의 순으로 각각 약 -50, -130, -180MPa의 값을 나타냈다. 이상의 결과를 보면 동일 시험편에 있어서도 시험편 표면과 내부에서는 잔류응력에 차이가 있음을 알 수 있다. LCR 파는 잔류응력과 밀접한 관계가 있는 변수임을 예측 할 수 있다. LCR파는 표면 바로 밑의 응력장의 방향으로 이동을 하기 때문에 재료 표면의 영향을 받지 않고 내부의 잔류응력을 평가하는데 유용한 초음파 기법임을 시사해 준다(Bray et al., 1999).

5. 결 론

본 연구에서는 Al7075-T651 압연판을 사용하여 모의 시험편에 따른 미세조직의 변화와 경도, 그리고 LCR파의 전파 특성과의 관계를 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험편의 조직과 경도는 LCR파의 전파특성에 영향을 미침

을 확인하였고, 시험편의 경도가 낮을수록 LCR파의 travel-time은 증가하는 경향을 보였다.

(2) 95%와 99% 신뢰수준에서 분산 분석을 통하여 Plate 1, 2, 3에 대한 travel-time data에는 유의함이 판명되었으며, LCR초음파 기법으로 세 개의 알루미늄 판을 구별할 수 있었다.

(3) LCR파의 travel-time은 표면 바로 밑의 응력장의 방향으로 이동하기 때문에 재료 표면의 영향을 받지 않고 내부의 잔류응력을 평가하는데 유용한 변수임을 확인하였다.

참 고 문 헌

김선진, 전창환, Bray, D. E.(2000). “LCR법에 의한 알루미늄 판의 잔류응력평가”, 한국동력기계공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp 136~141.

Basatskaya, L. V. and Ermolov, I. N.(1980). “Theoretical Study of Ultrasonic Longitudinal Subsurface Waves in Solid Media”, The Soviet Journal of Nondestructive Testing (defektoskopiya), Vol. 6, No. 7, pp 524~530.

Bray, D. E., Kim, S. J. and Fernandes, M.(1999). “Ultrasonic Evaluation of Residual Stresses in Rolled Aluminum Plate”, Nondestructive Characterization of Materials IX, AIP Conference Proceedings 497, pp 443~448.

Bray, D. E., Pathak, N. and Srinivasan, M. N.(1996). “Residual Stress Mapping in a Steam Turbine Disk Using the LCR Ultrasonic Technique”, Material Evaluation, Vol. 54, No. 6, pp. 832~839.

Bray, D. E., and Stanley, R. K.(1997). “Nondestructive Evaluation”, CRC Press, New York.

Egle, D. M. and Bray, D. E.(1976). “Measurement of Acoustoelastic and Third-Order Elastic Constants for Rail Steel”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 60, No. 3, pp 741~744.

Egle, D. M. and Bray, D. E.(1979). “Application of the Acousto-elastic Effect to Rail Stress Measurement”, Materials Evaluation, Vol. 37, No. 4, pp 41~46, 55.

Milton, J. C. and Arnold, J. C.(1986). “Probability and Statistics in the Engineering and Computing Sciences”, McGraw-Hill, New York.

Parlane, A. J. A.(1997). “The Determination of Residual Stresses”, Proc. Int. Conf. in Residual Stresses in Welded Const. and their Effects, London, U. K., pp 63~78.

Thompson, R. B., Smith, J. F. and Lee, S. S.(1984). “Effects of Microstructure on the Acoustoelastic Measurements of Stress”, Nondestructive Evaluation, The American Society for Metals, pp 137~145.

Wulpi, D. J.(1985). “Understanding How Metals Fail”, ASM, Metals Park. OH.

2001년 6월 8일 원고 접수

2001년 7월 21일 수정본 채택