

표면파를 이용한 쇼트피닝된 Al 7075 합금의 잔류응력 평가

Characterization of Residual Stress in Shot Peened Al 7075 Alloy Using Surface Acoustic Wave

김정석*, 김용권**, 박익근**†, 권숙인*

Chung Seok Kim*, Yong-Kwon Kim**, Ik-Keun Park**† and Sook In Kwun*

초 록 표면파를 이용하여 쇼트피닝된 Al 7075 합금의 잔류응력 분포를 평가하고자 하였다. 재료 내 표면층에 대한 잔류응력분포를 달리하기 위해서 피닝볼의 속도를 30 m/s로 하여 쇼트피닝을 수행하였다. 표면파의 속도는 초음파현미경을 이용하여 V(z)곡선법으로 측정하였다. 쇼트피닝 후 비커스경도를 측정한 결과 쇼트피닝에 의한 소성변형으로 0.25 mm 깊이까지 가공경화가 나타났다. 압축잔류응력이 증가하면서 표면파의 속도는 증가를 하였고 인장잔류응력이 작용할수록 표면파의 속도가 감소하였다. 표면파의 속도 변화는 X선 회절에 의해 측정된 잔류응력 변화와 밀접한 연관성을 나타내었다.

주요용어: 초음파현미경, V(z) 곡선법, 표면파, 쇼트피닝, 잔류응력

Abstract The residual stress in shot-peened Al 7075 alloy was evaluated using surface acoustic wave (SAW). Shot peening was conducted to produce a variation in the residual stress with the depth below the surface under a shot velocity of 30 m/s. The SAW velocity was measured from the V(z) curve using a scanning acoustic microscopy (SAM). The Vickers hardness profile from the surface showed a significant work hardening near the surface layer with a thickness of about 0.25 mm. As the residual stress became more compressive, the SAW velocity increased, whereas as the residual stress became more tensile, the SAW velocity decreased. The variation in the SAW velocity through the shot peened surface layer was in good agreement with the distribution of the residual stress measured by X-ray diffraction technique.

Keywords: Scanning Acoustic Microscopy (SAM), V(z) Curve, Surface Acoustic Wave (SAW), Shot Peening, Residual Stress

1. 서 론

Al 7075합금은 밀도가 낮으면서 인장강도 및 항복강도가 높고 가공성과 내식성 등이 우수하여 항공우주산업분야에 널리 사용되고 있다. 항공기 구조용소재로 사용되기 위해서 무엇보다 불안정한 파괴가 일어나지 않도록 강도와 인성이 우수해야 하고 소재의 수명을 향상시키기 위해서 특히, 보다

높은 피로특성의 향상을 요구하게 되었다. 재료의 피로특성을 향상시키기 위해서 완제품의 표면에 쇼트피닝이 활용되고 있다. 쇼트피닝은 재료의 표면 부위에 소성변형을 일으키고 가공경화 혹은 높은 압축잔류응력을 야기시키는 것으로 가장 널리 쓰이는 표면처리방법중의 하나이다. 재료의 표면이 쇼트피닝에 의해 압축잔류응력을 받게 되면 표면에서 형성되는 균열을 방지하게 되며 균열의 전파를 지

연하게 된다. 따라서 많은 재료에서 피로나 응력부식균열 특성을 향상시키기 위한 공정으로 널리 사용되고 있다. 재료의 표면상태가 기계적 특성에 크게 영향을 미치게 되므로 쇼트피닝에 의한 표면부에 형성된 잔류응력의 분포 변화를 이해하는 것이 중요하다 하겠다.

기존의 잔류응력 측정으로 신뢰성이 비교적 높은 천공법[1]은 잔류응력이 존재하는 부분에 구멍을 천공하면 주위의 잔류응력이 이완되고 이때 스트레인게이지를 이용하여 변형율을 측정하는 것이다. 그러나 잔류응력이 불균일한 응력분포를 갖는 경우 잔류응력측정에 한계가 있다. 자기적 방법으로 바크하우젠 노이즈법[2]은 자화의 과정에서 자구의 방향이 자장 외에 응력의 방향에 따라 변화하는 현상을 이용함으로써 응력은 자구벽의 이동에 영향을 미치게 된다. 하지만 바크하우젠 노이즈에 미치는 많은 복잡한 미세조직적인 영향을 배제하기가 매우 어렵다. 광학적인 방법[3]으로 Moiré 간섭효과를 이용하는 방법은 침투깊이가 너무 낮아 재료의 코팅층, 박막의 잔류응력 평가에는 효과적인 것으로 알려져 있으나 정량적인 평가는 효과적이지 못하다고 하겠다. X선 회절법[4,5]은 원자 면간 거리를 측정하게 되고 면간거리의 변화로부터 재료의 변형율을 측정하게 된다. X선 회절법의 경우 침투깊이는 약 수 마이크로미터로 쇼트피닝시 약 수백 마이크로미터 깊이를 갖는 잔류응력분포를 비파괴적으로 평가하는 데는 많은 어려움이 있다고 하겠다. 일반적인 초음파법[6-8]은 결정격자의 변형 정도와 초음파 속도와의 관계를 바탕으로 비파괴적으로 응력의 변화를 평가할 수 있다. 일반적인 초음파 종파 및 횡파는 재료전체를 전파하므로 재료전체에 걸친 평균적인 잔류응력을 나타내게 된다. 하지만 쇼트피닝과 같이 잔류응력이 깊이 방향으로 분포하고 있는 경우 표면부에서 내부로 평가할 수 있는 방법은 매우 제한적이다 할 수 있다. 이상에서와 같이 비파괴적으로 표면에서 응력의 깊이방향 분포를 평가할 수 있는 방법은 전무하다고 할 수 있다. 하지만 표면파(surface acoustic wave, SAW)는 한파장 깊이를 전파하므로 주파수를 변환하여 침투깊이를 달리 하면 표면 및 표면 근방에서의 잔류응력을 평가할 수 있다고 하겠다.

본 연구에서는 표면파를 이용하여 쇼트피닝된 상용 Al 7075 합금의 잔류응력분포를 평가하고자 하였다. 표면파의 침투깊이는 주파수가 서로 다른 압

전소자와 주파수 튜닝을 통하여 초음파의 침투깊이를 달리하였다. 표면파의 속도는 $V(z)$ 곡선법을 이용하여 측정하였고 X선 회절법에 의해 측정된 잔류응력과 비교하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 Al 7075 합금의 화학적 조성은 무게비로 1.6%Cu, 2.6%Mg, 0.021%Mn, 0.24%Fe, 0.05%Si, 5.7%Zn, 0.09%Ti, 0.21%Cr, 나머지는 Al이며 480°C에서 한 시간 동안 아르곤 분위기에서 용체화처리후 공냉하였다. 전계방출형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscopy, FESEM)을 이용하여 쇼트피닝후 표면부에 대한 미세조직을 관찰했으며, 메탄올 100 ml에 2.5 ml 염산과 2 ml 플루오르화 수소산을 섞은 용액으로 에칭후 광학 현미경으로 관찰했다.

쇼트피닝을 위한 시험편은 용체화처리된 Al 7075 합금을 20×20×100 mm 로 가공하였으며, 0.8 mm 직경의 탄소강 쇼트볼로 4분 동안에 30 m/s 속도로 투사되는 임펠러 타입의 피닝머신(PMI 0608)으로 쇼트피팅하였다. 쇼트피닝후 표면조도계(Mitutoyo SV-624)를 이용하여 시험편의 표면거칠기를 측정하였다. 측정구간은 1.5 mm, 탐촉자의 속도는 1 mm/s로 하여 10회 측정하였다. 쇼트피닝에 의한 표면 깊이 방향으로의 경도 변화를 측정하기 위하여 비커스 경도시험기를 이용 500g, 15s의 조건으로 쇼트피닝에 의해 형성된 표면 스케일층을 연마후 피닝 표면으로부터 깊이방향으로 미소경도시험을 행하였다. 각 경도값은 10회를 실시하고 평균치를 구하였다.

표면파 속도는 주파수 범위가 5~200 MHz이며 높은 주파수의 톤버스트파를 발생할 수 있는 초음파현미경(Hitachi, HSAM 220)을 사용하여 측정했다[9]. ΔZ 는 고속 퓨리에 변환을 통한 $V(z)$ 곡선으로부터 측정하였고 표면파 속도, V_{SAW} 는 아래 식으로부터 계산되었다[10,11].

$$V_{SAW} = \frac{V_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_w}{2f\Delta z}\right)^2}} \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수, V_w 는 중간매질인 물속에서의 음속, ΔZ 는 $V(z)$ 곡선의 한 파장 거리이다.

ΔZ 는 상대위상변화가 2π 가 되는데 필요한 z방향의 거리로써 중간매질에서의 파장(λ_w)과 속도(V_w) 그리고 표면파의 속도(V_R)의 함수이고 스넬의 법칙에 의해 레일리 임계각, $\theta_R = \sin^{-1}(V_w/V_R)$, 의 관계로 표현되며 다음의 식과 같다[11].

$$\Delta Z = \frac{1}{2(1 - \cos \theta_R)} \quad (2)$$

표면파의 침투 깊이를 변화 시키기 위해서, 4개의 서로 다른 집속탐촉자(10 MHz, 25 MHz, 75 MHz, 200 MHz)를 사용하여 주파수를 조정하였다. 각 주파수에서의 표면파속도는 식 (1)에 의해서 계산되었다. 쇼트피닝과정에서 생성된 표면 스케일과 표면 거칠기에 의한 음파의 산란을 최소화하기 위해 시험편을 평면으로 표면스케일을 포함하여 약 0.03 mm 기계연마하였다.

X선 회절법은 일반적으로 재료의 건전성과 잔류응력을 측정하는데 사용되어진다. 재료 내에 잔류응력이 존재하면 재료의 면간거리가 변하게 된다. 이들 변화를 이용하여 다음식과 같이 변형율을 구할 수 있다[4,5].

$$\varepsilon = (d - d_0) / d_0 \quad (3)$$

여기서, ε 은 변형율, d 는 변형후 면간거리, d_0 는 변형전 면간거리이다.

잔류응력의 깊이방향 분포는 기계적 연마후 과염소산으로 전해연마를 하면서 고 분해능 X선 회절장치(high resolution X-ray diffraction, HRXRD)를 사용하여 측정하였다. Philips사의 X'PERT™ 은 Ge (2 2 0) 4개의 단결정배열을 이루고 있으며 각 분해능은 $\pm 0.0003^\circ$ 이고 X선으로 Cu $K_{\alpha 1}$ 를 사용하였다. Fig. 1(a)에서와 같이 회절면은 $30 \leq 2\theta \leq 170$ 의 범위에서 2θ 스캔을 하여 결정면을 결정하고 변형율 측정은 $2\theta = 78.2^\circ$ 의 (311) 결정면을 이용하였다. (311) 결정면에 대해서 2θ 는 고정하고 시험편을 $-79.5 \leq \psi \leq 79.5$ 의 범위로 기울여가면서 ψ 스캔을 하여 측정하였다(Fig. 1(b)). 이와 같이 2θ - ψ 스캔을 하여 나타낸 결과는 Fig. 1(c)와 같이 3차원으로 나타낼 수 있다. 그러므로 조밀 면간거리 d 와 $\sin^2\psi$ 에 대한 그래프를 얻게 되고 이들의 선형회귀분석을 통하여 Fig. 1(d)와 같은 직선그래프에서 직선의 Y절편으로부터 조밀면간거리 d 를 구하게 된다. 이렇게 구해진 면간거리를 이용하여 각 부분의 변형율과 재료의 탄성계수를 이용하여 잔류응력을 구하였다.

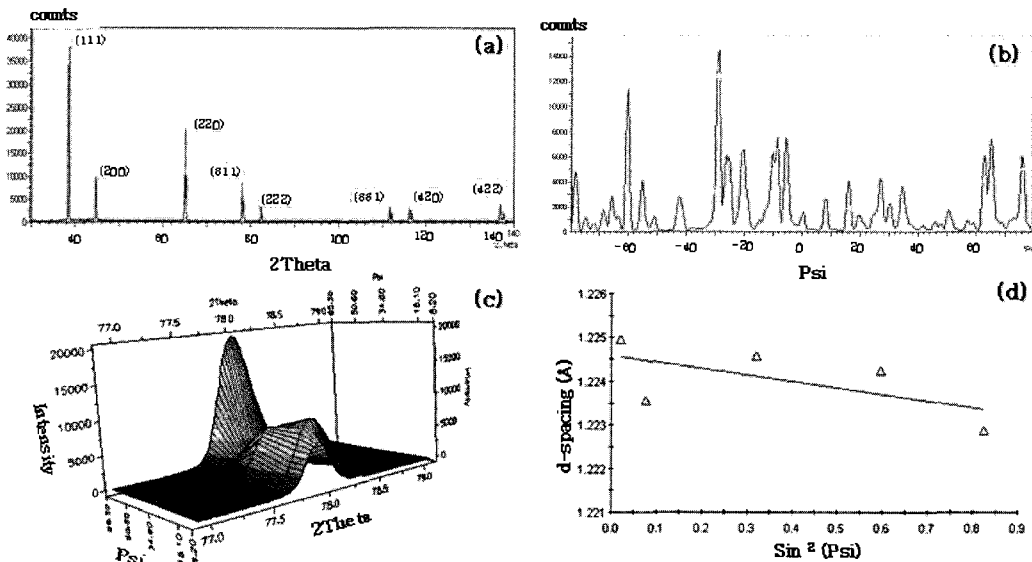


Fig. 1 X-ray diffraction results: (a) diffraction pattern in the scanning range $30 \leq 2\theta \leq 170$, (b) diffraction pattern in the scanning range $-79.5 \leq \psi \leq 79.5$, (c) the 2θ - ψ plot and (d) the d-spacing vs. $\sin^2\psi$ plot

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 쇼트피닝된 Al 7075 합금 시험편의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. 압연된 길이방향으로 결정립이 가늘고 길게 연신되어 있고 표면 근처의 결정립은 쇼트피닝에 의해 소성변형되었음을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 쇼트피닝후 표면에 대한 주사전자현미경사진으로 표면에 수많은 조각모양의 껍질을 관찰할 수 있다. 초기 쇼트피닝전 표면 거칠기가 $0.6\ \mu\text{m}$ 인데 반해 쇼트피닝후의 최종 표면 거칠기는 $24\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. Fig. 3은 쇼트피닝된 표면으로부터 깊이에 따른 비커스 경도와 쇼트피닝되지 않은 시험편의 변화를 보여준다. 깊이 방향으로 얻어진 비커스 경도값은 약 $0.25\ \text{mm}$ 두께까지 쇼트피닝에 의한 소성 변형의 영향으로 경도의 증가를 보였다. 쇼트피닝되지 않은 시험편 표면에서 경도값 Hv 130인 반면에 쇼트피닝된 시험편의 최대 비커스 경도값은 표면에서 약 Hv 170이다. Fig. 4는 쇼트피닝된 재료에서 각기 다른 주파수에서 얻은 전형적인 V(z) 곡선들을 보여주고 있

다. 탐상범위가 $0.1\ \text{mm}^2$ 인 미소영역으로부터 V(z) 곡선을 얻게 되므로 표면의 미소영역에 대한 표면파의 속도측정이 가능하게 된다. 따라서 시편의 여러 부분을 탐상하여 시험편 표면전체에 대한 평균 정보를 얻을 수 있다. 주파수가 높을수록 디포커싱 거리에 따라서 급격한 감쇠가 일어남을 알 수 있다. 이러한 V(z) 곡선 상에서 피크와 피크간 거리인 ΔZ 를 나타내었다. Fig. 5는 (311) 회절면의 피크에 대한 반가폭(full width half maximum, FWHM)의 변화와 표면부터 깊이방향으로 경도의 변화를 나타낸 것이다. 반가폭이 표면부에서 가장 높았고 점차 감소하여 $0.1\ \text{mm}$ 이후에는 거의 변화 없이 일정하였다. 이는 재료가 받은 손상이 표면에서 최대이고 표면에서부터 내부로 들어갈수록 감소됨을 정성적으로 나타내고 있다. X선 회절선의 폭은 결정립크기효과와 변형과 관련된 격자 일그러짐에 의해 나타나게 된다[9]. 특히, 변형에 의한 회절선 폭의 증가는 회절체적내에서 각각의 위치에대한 국부적인 미소변형률에 의한 것으로 이는 전위와 관련된 것이다.

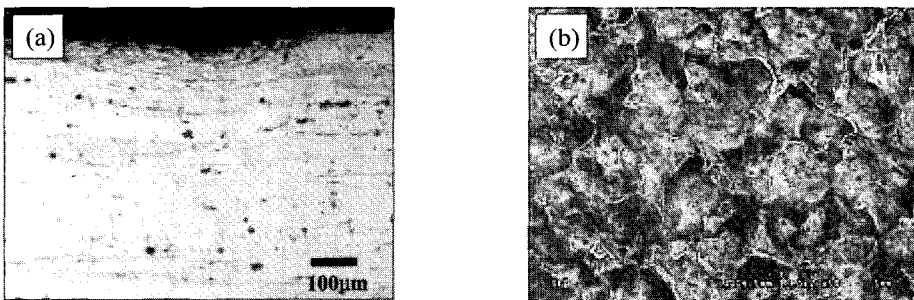


Fig. 2 Optical and FESEM micrographs: (a) cross section of shot peened Al 7075 alloy and (b) extensive flaky surface

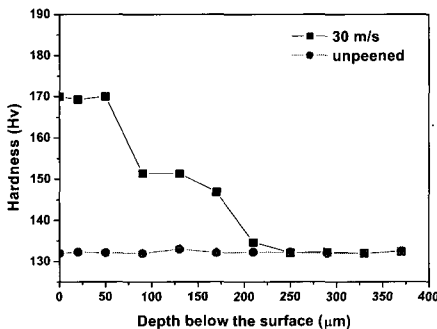


Fig. 3 Vickers hardness of shot peened Al 7075 alloy with the depth below the surface

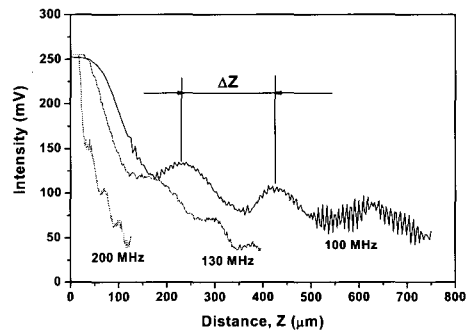


Fig. 4 The typical V(z) curves of shot peened Al 7075 alloy under different frequencies

Fig. 6은 주파수를 조정하여 표면으로부터 거리에 따른 표면파 속도와 X선 회절법을 이용하여 측정된 잔류응력의 변화를 나타내었다. 잔류응력은 표면에서 깊이 방향으로 압축잔류응력이 작용하고 있으며 약 20 μm 부근에서 최대 압축잔류응력을 나타내었고 이후 압축잔류응력이 감소하였다. 표면파속도는 압축잔류응력이 작용하는 곳에서 최대가 되고 깊이에 따라서 감소하였다. 이렇듯, 잔류응력과 표면파 속도의 관계는 잔류응력이 압축잔류응력이 클수록 표면파의 속도는 증가하고 잔류응력이 인장잔류응력이 될수록 표면파의 속도가 감소됨을 알 수 있다. 하지만 깊이가 100 μm 이상에서는 SAW 속도와 잔류응력과의 관계는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 이는 실험에 사용한 저주파수 (10 MHz, 25 MHz) 집속탐촉자의 분해능이 낮아짐으로 해서 나타난 결과로 생각되고 추후 이러한 측정관계성 극복을 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

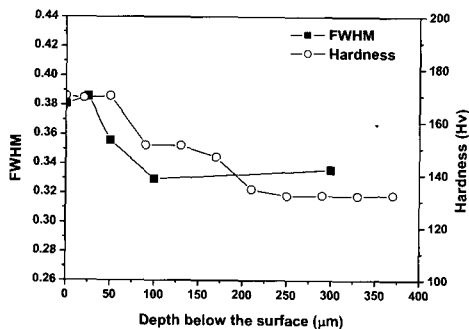


Fig. 5 Variation in the FWHM and hardness with the depth below the surface

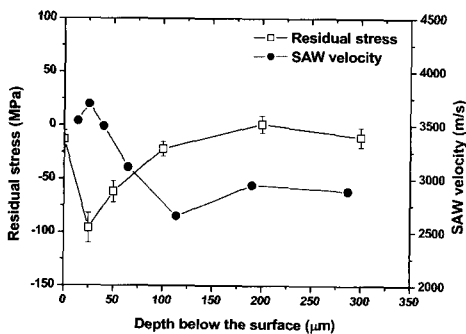


Fig. 6 Variation of Residual stress and SAW velocity with the depth below the surface

기존의 응력과 초음파 속도에 관한 연구는 초음파의 속도에 대한 응력의 영향을 나타내는 음탄성관계[12-14]를 기반으로 한 것으로 Okade 등[13]은 Al 2017 합금의 인장변형에 대한 표면파 속도를 보고하였다. 인장방향에 평행한 방향으로 표면파의 속도는 인장응력이 증가함에 따라서 감소를 하였으며 인장방향에 수직방향으로 표면파의 속도는 인장응력에 따라서 선형적으로 증가함을 보였다. 그리고 표면파의 속도를 측정하여 음탄성상수를 실험적으로 구하였다. Lee 등[14]은 초음파현미경을 이용하여 Al 6061 합금의 인장변형시 인장축에 수직인 방향과 평행한 방향에 따른 표면파의 속도와 변형율이 선형적인 관계가있음을 보고 하였다. 이상의 보고에서와 같이 응력과 초음파속도는 매우 밀접한 관계를 보이며 본 연구의 결과에서도 압축잔류응력하에서 초음파의 속도는 인장잔류응력하에서 보다 높다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 초음파 속도에 대한 응력의 의존성을 연구한 기존의 연구결과와 유사한 결과를 나타낸 것이라 할 수 있다.

4. 결론

V(z) 곡선법으로 측정된 표면파의 속도변화를 이용하여 쇼트피닝된 Al 7075 합금에서 잔류응력분포를 평가하고자 하였다. 쇼트피팅된 표면층에 대한 경도측정 결과 소성변형에 의한 가공경화층은 0.25 mm로 나타났으며 X선회절에 의해 측정된 잔류응력은 20 μm 부근에서 최대 압축잔류응력을 나타내었고 이후 압축잔류응력이 감소하였다. 표면파 속도는 X선 회절법에 의해 측정된 잔류응력 분포와 좋은 상관관계를 보임으로써 표면파 속도로부터 Al 7075 합금의 쇼트피닝에 의한 잔류응력 상태를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. R. Viotti, et al., "Portable digital speckle pattern interferometry device to measure residual stresses using the hole drilling technique," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44, pp. 1052-1066, (2006)
- [2] D. M. Stewart, et al., "Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel," Current Applied Physics, Vol. 4, pp. 308-311, (2004)

- [3] M. Ya, et al., "Residual stress in laser welded Aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods," *Materials Science and Engineering A382*, pp. 257-264, (2004)
- [4] I. C. Noyan and J. B. Cohen, "An X-Ray diffraction study of the residual stress-strain distributions in shot peened two-phase Brass," *Materials Science and Engineering*, Vol. 75, pp. 179-193, (1985)
- [5] C. H. Ma, et al., "Residual stress measurement in textured thin Film by grazing-incidence X-Ray diffraction," *Thin Solid Films*, Vol. 418, pp. 73-78, (2002)
- [6] Z. M. Yang, et al., "Characteristics of residual stress in Mo/Ti functionally graded material with a continuous change of composition," *Materials Science and Engineering A358*, pp. 214-218, (2003)
- [7] M. O. Si-Chaib, et al., "An ultrasound method for the acoustoelastic evaluation of simple bending stresses," *NDT & E International*, Vol. 34, No. 8, pp. 521-529, (2001)
- [8] D. E. Bray and W. Tang, "Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the LCR ultrasonic wave," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 207, pp. 231-240, (2001)
- [9] 조동수, 박익근, 김용권, "초음파현미경에서 V(z)곡선을 이용한 세라믹/금속 접합계면의 비파괴평가", *비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 332-339, (2004)
- [10] D. Rats, et al., "High frequency scanning acoustic microscopy: a novel nondestructive surface analytical tool for assessment of coating-specific elastic moduli and tomographic study of subsurface defects," *Thin Solid Films*, Vol. 355-356, pp. 347-352, (1999)
- [11] R. J. M. Frnseca, et al., "Scanning acoustic microscopy-recent applications in materials science," *Advanced Materials*, Vol. 5, pp. 508-519, (1993)
- [12] D. E. Bray and R. K. Stanley, "Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service," pp. 143-172, McGraw-Hill, New York, (1989)
- [13] M. Okade and K. Kawashim, "Local stress measurement on polycrystalline Aluminum by an acoustic microscope," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 933-939, (1998)
- [14] Y. C. Lee, J. O. Kim and J. D. Achenbach, "Measurement of stresses by line-focus acoustic microscopy," *Ultrasonics*, Vol. 32, No. 5, pp. 359-365, (1994)