

Al-Si 합금 열간단조품 내부의 판상 결함의 초음파 특성

Ultrasonic Characteristics of Internal Planar Defects of a Hot Forged Al-Si Alloy Part

이석원*, 전만수**, 이준현***

Seok-Won Lee*, Man-Soo Joun** and Joon-Hyun Lee***

초 록 본 연구에서는 Al-Si 합금 열간단조품 내부 판상 결함을 탐지하기 위한 초음파평가 기법을 확립하였다. 이를 위하여 내부에 존재하는 여러 가지 판상 결함의 초음파 특성을 실험적으로 구하였으며, 펄스-반사법을 적용하여 초음파 탐상신호에 대한 내부 판상 결함의 각도 등이 초음파 수신신호의 형태에 미치는 영향을 평가하였다. 한편 결함위치에 따른 초음파 신호특성을 규명하기 위하여 단조품 가장자리 부위에 존재하는 내부 판상 결함의 초음파 수신신호 특성을 평가하였으며, 본 시험편에 대한 초음파 투과법 적용 한계에 대하여 고찰하였다. 나아가 500개 이상의 파단 실험을 통해 제시된 초음파 평가기법의 신뢰성을 확인하였다.

주요어어: Al-Si 알루미늄 합금, 열간단조, 초음파검사, 판상균열

Abstract A nondestructive evaluation technique for detecting internal defects of an hot forged Al-Si alloy part is established in this study. Ultrasonic characteristics of various internal planar defects are investigated by experiments for establishing a reliable test procedure. The effect of the angle between ultrasonic energy propagation directions and planar defects on the ultrasonic signal configuration is evaluated in the pulse-echo technique. A characteristic of ultrasonic signal for the internal planar defect located near the edge is also evaluated. The applicability of the through-transmission technique is also discussed. Reliability of the presented approach is validated by the destructive testing for more than 500 specimens.

Keywords: Al-Si Alloy, hot forging, ultrasonic test, planar defect

1. 서 론

Al-Si 알루미늄 합금은 우수한 주조성과 단조성을 보유하고 있고, 열팽창계수가 낮고 내마모성이 높아 자동차 부품 등의 소재로 이용되고 있다. 단조품의 경우, 결함이 없다면 기계적 성능이 우수하고 생산단가가 낮아 유리한 면이 많은 반면, 여러 가지 이유로 결함이 발생할 가능성이 높다. 특히, 알루미늄 열간단조는 공정 조건이 까다롭

다. 단조품의 결함은 균열, 겹침, 내부파열 등[1] 여러 가지 형태가 있으며, 그 원인도 다양하다. 재료의 온도, 가열시간, 금형의 형태, 금형온도, 윤활재, 단조속도, 재료의 조직 등[2-4]이 대표적인 예이다.

항공기, 자동차 등에 사용되는 주요 부품이 단조품이다. 항공기에 사용되는 모든 단조품은 개발 단계에서부터 그 품질을 보증하는 비파괴평가기법이 동시에 개발되지만, 상대적으로 자동차 부품과 농기계 부품 등은 그렇지

못한 것이 현실이다. 자동차 부품 수출이 급증하고 있는 이 때에 대량 생산되는 단조품의 신속 평가 시스템을 구축하여 생산성을 유지하면서 품질을 보증하는 평가기법의 개발이 절실하게 요구되고 있다. 특히 단조품의 경우 공정에 따라 발생하는 결함들의 형상, 위치 등이 다양하여 이들 특성에 맞는 적합한 비파괴 평가 기법의 확립이 요구된다.

일반적으로 단조품의 표면결함 평가 목적으로 침투탐상시험기법과 자분탐상시험기법이 널리 사용되고 있다. 형광침투탐상시험기법은 침투제의 감도 향상과 검사의 재현성이 높아 대형 단조품의 국부검사와 소형 단조품의 다량검사에 도입되어 적용되고 있으나 표면결함의 검출에 국한되므로 그 적용에 한계가 있다. 자분탐상시험기법은 강자성체에만 적용 가능하므로 알루미늄 등의 비자성체의 결함 검출에는 적용이 불가능하다. 내부결함의 검출에는 방사선투과시험기법과 초음파탐상시험기법이 주로 이용된다. 최근들어 초음파 공명기법을 이용한 장치가 도입되어 시도되고 있으나 찾고자 하는 결함과 동일한 공진주파수를 갖는 표준 비교시험편 제작의 기술적 문제로 실제 적용에는 한계가 있다[5].

본 연구에서는 자동차 에어컨용 압축기의 피스톤에 이용되는 Al-Si 합금 열간 단조품의 축 중심 부위의 내부 판상 결함에 대한 초음파 특성을 파악하여 최적 평가조건을 구하였다.

2. 시험편의 선정

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 열간단조된 Al-Si 합금 피스톤을 실험 대상으로 선정하였으며, 재료의 화학조성을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Chemical composition of AP-2 material(wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
11.275	0.430	4.211	0.006	0.676	0.029	0.017	Bal.

Fig. 2는 유한요소법을 이용한 2차원 단조시뮬레이션 프로그램(AFDEX-2D)[6]으로 판상 결함 발생 가능 구역을 예측한 것이다. 예측한 결과는 실제 단조품의 내부 판상균열 발생구역과 일치하였다. 시험편 내부 판상 단조균열은 초음파 진행방향에 대해 약 40° ~ 50° 의 각도로 존재하였다. 금속 유동선도 및 변형률 분포를 바탕으로

판단할 때, 내부 결함이 발생할 가능성을 확인할 수 있다. 실제 소재 및 공정 조건상 부적절한 요인이 발생하면, 내부결함으로 발전할 가능성이 높다.

시험편은 Fig. 3과 같이 풀림처리된 소재를 절단한 후 약 400℃로 가열하여 열간 단조한 것으로, 단조후 용체화 열처리 및 인공시효 열처리를 실시하였다.

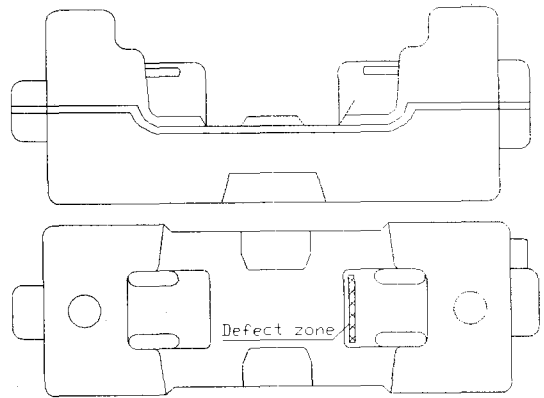
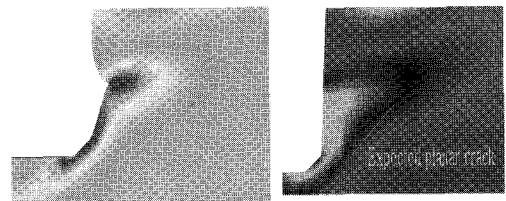


Fig. 1 Hot forged specimen



(a) Before the final forged (b) The final forged condition

Fig. 2 FEM simulated metal flow

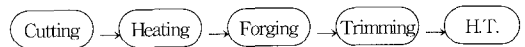


Fig. 3 Sequence of hot forging specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 열간단조 피스톤 중심부 판상 결함의 초음파 특성 및 결함 평가

초음파탐상평가에서 결함의 면적, 결함의 형태 등에 따라 초음파 수신 신호의 특성이 변화한다[7-9]. 그러므로, 신뢰성 있는 초음파탐상평가를 수행하기 위해서는 결함

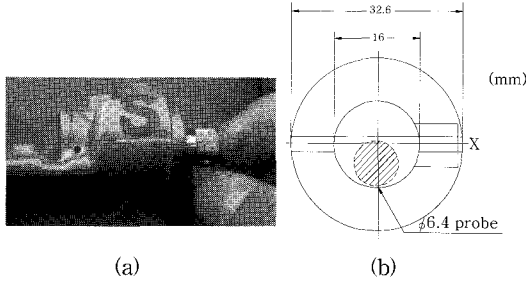


Fig. 4 A reference specimen and positioning of ultrasonic transducer

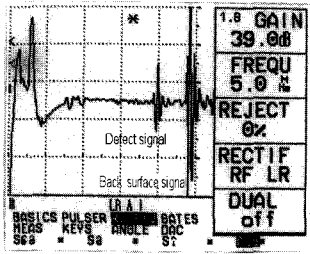
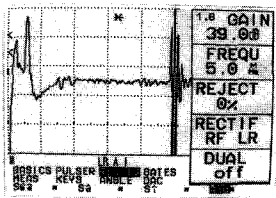
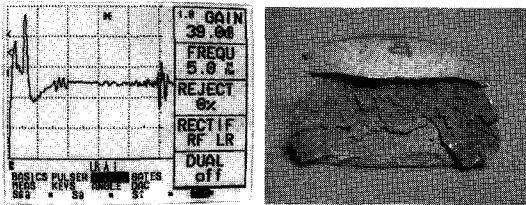


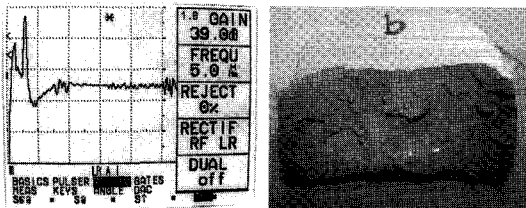
Fig. 5 Ultrasonic signal scanned by the pulse-echo method



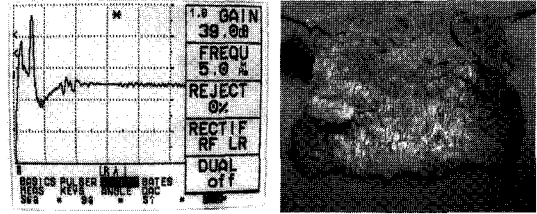
(a) Specimen without defect



(b) Specimen with 140mm² planar defect



(c) Specimen with 150mm² planar defect



(d) Specimen with 220mm² planar defect

Fig. 6 Ultrasonic signals scanned by the pulse-echo method for various specimen

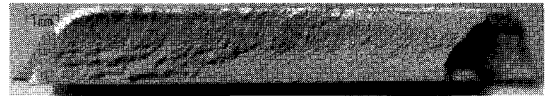


Fig. 7 Typical section view of sound texture

의 모양과 초음파 수신신호의 상관관계를 파악하는 것이 필요하다.

결함의 형태에 따른 초음파 수신 신호의 특성을 실험하기 위해 초음파 탐상기(Krautkramer사의 USD15)를 사용하여 각 시험편의 결함 존재 가능 영역을 평가한 후 시험편을 절단하여 검증하였다.

초음파탐상평가절차는 결함을 보유한 인공 시험편으로 초음파탐상장치의 탐상 조건을 구한 후 미지의 시험편에 시험하여 그 건진성을 확인하는 것으로 구성된다. 본 실험에서도 Fig. 4(a)와 같이 결함이 존재할 가능성이 높은 지점에 지름 2mm 크기 구멍의 인공결함을 지닌 시험편에 대해 Fig. 4(b)의 X 축 중심부위를 탐상하여 Fig. 5의 초음파 신호를 얻었다. 이는 주파수 5MHz, 지름 6.4mm의 초음파 탐촉자를 이용하여 펄스반사법(pulse-echo method)으로 주사(scan)한 것이다. 저면신호(back surface signal)와 인공결함신호가 뚜렷하게 구분되어 나타나고 있다. 인공결함신호가 40FSH(full scale height)일 때 초음파평가장치의 이득(gain)은 39dB를 지시하였다.

Fig. 5에서 이용된 것과 동일한 초음파 평가 조건을 이용하여 결함이 없는 시험편, 내부 판상 결함이 있는 시험편에 대해 평가하였다. Fig. 6(a)는 축 중심부위가 건진한 시험편, Fig. 6(b)는 초음파 입사면에서 32mm~39mm의 거리에 존재하는 140mm²의 내부균열이 있는 시험편, Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 초음파 입사면에서의 거리가 각각 32mm~39mm, 29mm~39mm인 곳에 면적이 각각 150mm²와 220mm²인 내부균열이 표면까지 연결된 시험편의 초음파신호를 나타내고 있다. Fig. 7은 Fig. 6(a)에

사용된 시험편의 단면이고, Fig. 8은 Fig. 6(b)에 사용된 시험편의 단면을 나타내고 있다.

Figs. 6(b), 6(c), 6(d)에서는 Fig. 5에서와 같은 결함 신호가 나타나지 않았다. 시험편 내부 판상 결함의 크기가 증가할수록 초음파 저면신호는 감소하여 나타났다. Fig. 7의 건진 조직은 단면의 광택이 없지만 Fig. 8의 결함조직은 밝은 광택을 나타내었다.

지름 2mm의 인공결함이 검출되는 것과 동일 탐상 조건으로 주사하면 본 시험편의 내부 판상 결함의 신호는 전면신호(front surface signal)와 저면신호 사이에 나타나지 않았다. 대비시험편의 인공 드릴구멍과 내부 미세 판상 결함의 기하학적 모양의 상이, 초음파 진행방향에 대한 결함면의 방향 차이, 결함면의 표면 거칠기 차이 등이 이러한 현상에 영향을 미치는 인자로 평가된다. 이 특성은 시험편 내부 결함의 존재 유무확인 목적으로는 이용될 수 있으나, 결함크기의 정량적 평가의 기준으로 사용하기에는 한계가 있다.

전면신호와 저면신호 사이에 내부 판상 결함의 신호가 나타날 가능성을 실험하기 위해 초음파탐상장치의 이득을 증가시켰으며 탐상주파수도 10MHz로 증가시켰다. 다수의 시험편에 대해 순차적으로 이득을 증가시켰으며 18 dB를 증가시켜 57dB일 때 대부분의 내부 판상 결함의 신호가 Fig. 9와 같이 전면신호와 저면신호 사이에 나타났다.

이론적으로 결함신호는 결함이 초음파의 진행방향에 수직일 때 가장 크게 나타나며, 결함이 초음파의 진행방향에 평행할 때 가장 작게 나타난다. Fig. 9(a)는 13×5mm크기의 판상 결함이 시험편의 축 방향에 대해 43°의 각도로 존재하는 것이며 Fig. 9(b)는 14×3mm 크기의 유사한 결함이 축방향에 대해 45°의 각도로 존재하는 것을 나타낸다. Fig. 9(a)의 시험편의 결함크기는 Fig. 9(b)의 시험편의 결함 크기와 결함의 모양이 유사하다.

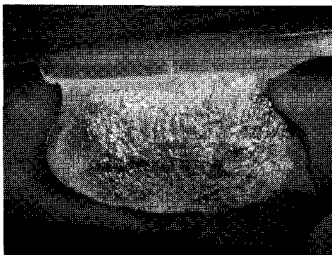
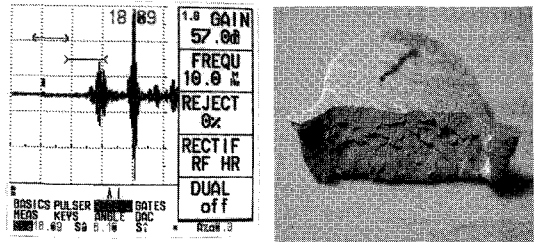
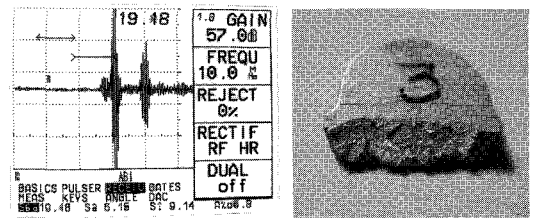


Fig. 8 Typical planar defect disclosed by a destructive testing

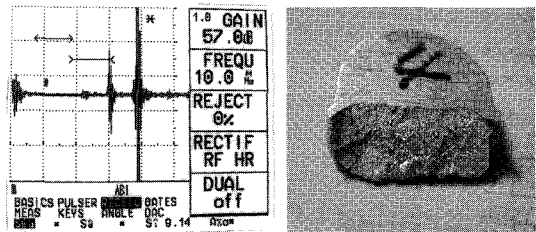
그러나 Fig. 9(a)의 시험편은 Fig. 9(b)의 시험편 보다 초음파 결함 수신신호가 크게 나타났다. 이는 결함 크기의 차이보다 초음파 진행방향에 대한 결함의 각도와 결함면의 표면조도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.



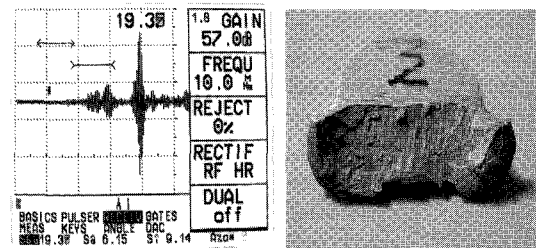
(a) 43°



(b) 45°



(c) 46°



(d) 47°

Fig. 9 Comparison of the ultrasonic signal and the defect orientation

한편, Fig. 9(c)는 15×6mm 크기의 결함이 축방향에 대해 46°의 각도로 존재하는 것을 나타내고 있으며 Fig. 9(d)는 16×6mm 크기의 결함이 47°로 존재하는 것을 나타낸다. 두 시험편의 결함의 크기가 유사하지만 Fig. 9(d)의 시험편의 초음파 결함 수신신호가 작게 나타났다. 이런 현상이 나타나는 이유는 초음파 진행방향에 대한 결함의 각도와 결함의 크기뿐만 아니라, 평면형태의 결함인 Fig. 9(c)와 곡면형태의 결함단면을 나타내는 Fig. 9(d)의 결함 형태에 따른 초음파의 산란 특성이 다르기 나타난 것으로 판단된다.

이를 통해 시험편 내부에 존재하는 결함의 크기, 초음파의 진행방향에 대한 결함의 각도, 결함표면의 형태, 결함면의 조도 등이 결함신호의 형성에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 실험과정에서 접촉매질의 두께 차이와 탐촉자에 가하는 압력의 차이의 시험조건에 따라 오차가 발생할 수 있으므로 일정한 조건을 유지하도록 주의해야 한다.

3.2. 열간단조 피스톤 가장자리 부위에 존재하는 작은 판상 결함의 초음파 특성

Fig. 10은 판상 균열이 존재할 수 있는 가장자리 부위를 나타내고 있으며, Fig. 11(a)는 시험편의 가장자리 부위에 존재하는 지름 2mm 크기의 작은 판상 결함의 한 예이다. 3.1절의 기법으로 가장자리 부위에 작은 판상 결함이 있는 시험편을 주사하면 전면신호와 저면신호 사이에 내부 판상 결함의 신호가 나타나지 않으며, 저면신호의 감소가 발생하지도 않는다. 결함이 가장자리 부위에 존재할 때는 기하학적 한계로 인하여, 결함 영역에 충분한 초음파 에너지가 전달되지 않기 때문이라고 판단된다.

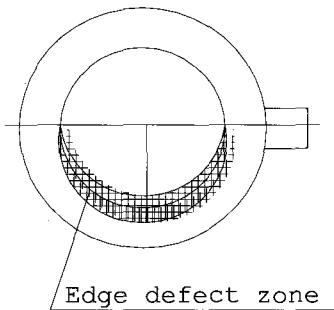


Fig. 10 Sketch of small planar defect locating zone near the edge

초음파 주파수 10MHz, 지름 6.4mm인 NDT system사의 탐촉자를 시험편 전면의 가장자리에 위치시켜 Fig. 11(b)와 같은 신호를 얻을 수 있었다. 저면신호를 주의 깊게 살펴보면 이에 근접하여 나타난 "A" 표식의 신호를 확인할 수 있다. 이 신호는 시험편의 가장자리부위에 존재하는 작은 판상 결함을 나타낸다. 가장자리 판상 결함의 크기 증가에 따라 이 신호의 진폭이 증가하는 특성을 나타내었으며 탐촉자의 중심이 탐상면의 가장자리 경계에 위치할 때 최대의 결함 수신신호를 얻을 수 있었다.

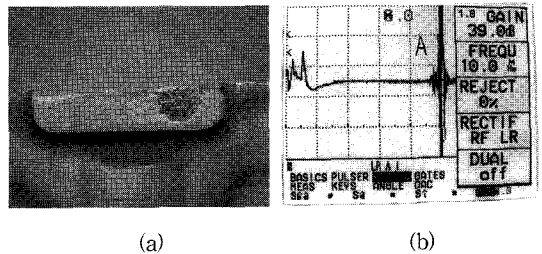


Fig. 11 Section view of planar defect at near edge and its ultrasonic signal

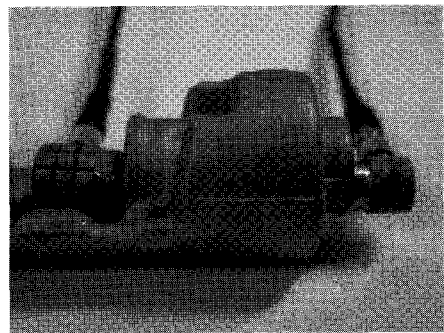


Fig. 12 Scanning by through-transmission method

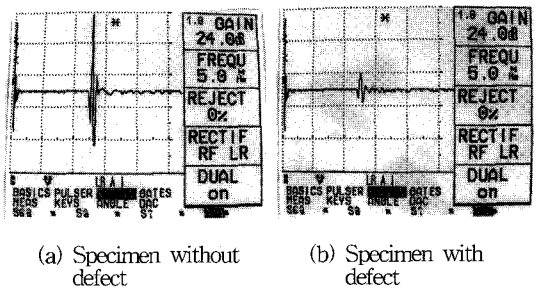


Fig. 13 Ultrasonic signals scanned by the through-transmission

3.3. 초음파 투과법에 의한 판상 결함의 평가

Fig. 12는 투과법(through-transmission technique)을 이용한 초음파탐촉자의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 13(a)는 건전 조직, Fig. 13(b)는 내부 판상 결함이 있는 시험편의 초음파신호를 나타내고 있다. 실험에서 초음파 주파수는 5MHz와 10MHz가 사용되었으나 주파수 변화에 따른 차이는 나타나지 않았다. 60mm²의 내부 판상결함이 존재할 경우 건전 조직에 비해 약 14dB의 개인 차이를 나타내었다. 이 기법은 가장자리 부위의 2~3mm 지름의 판상 결함을 검출하지 못하는 한계를 나타내었다. 검사자가 송수신탐촉자의 중앙선을 맞추면서 검사하면 속도가 매우 느리므로 탐상 속도를 향상시키기 위해서는 송신용 및 수신용 두 탐촉자의 중심 축을 정렬하는 장치가 필요하다.

4. 결 론

Al-Si 합금 열간단조 피스톤의 초음파 특성에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인공결함의 초음파 신호의 진폭이 40% FSH이 되도록 검사장치의 이득을 조정한 후 초음파평가를 실시하면 전면신호와 저면신호 사이에 시험편 중심부의 판상 결함 신호가 나타나지 않는다. 이 기법에서는 판상 결함의 조건에 따라 저면신호의 크기가 변화한다. 초음파의 진행방향과 단조품 내부의 미세 판상 결함 사이의 각도, 결함면의 표면 거칠기 등의 차이가 이러한 초음파특성에 영향을 미치는 인자라고 판단된다. 이 특성은 결함 크기의 정량적 평가의 기준으로 이용될 수는 없지만 결함의 존재 유무를 확인하는 기법으로 이용될 수 있다.
- (2) 가장자리 부위의 작은 판상 결함은 전면신호와 저면신호 사이에서 시간축에 비례한 곳에 결함신호를 형성하지 않았다. 결함으로 인한 저면신호의 감소는 발생되지 않았으며 저면신호에 근접한 곳에 작은 신호를 나타내었다. 이는 결함 영역에 충분한 초음파 에너지가 전달되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 이 신호는 판상 결함의 크기에 따라 그 크기가 변화하였으며 탐촉자의 중심이 탐상면의 가장자리 경계에 위치할 때 최대의 결함 수신 신호를 얻을 수 있었다.

- (3) 시험편 내부에 존재하는 결함의 크기, 초음파의 진행 방향에 대한 결함의 각도, 결함표면의 형태, 결함표면의 조도가 결함신호의 형성에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.
- (4) 투과법으로 시험편의 중앙부위의 판상 결함 검출이 가능하지만, 가장자리 부위의 결함은 검출이 불가능하였다. 500개 이상의 파단 실험을 통해 열간단조 피스톤의 내부 판상균열 검출을 위해 본 연구에서 사용한 기법의 신뢰성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 이석원, 전만수, 김남경, "자분탐상검사", 대광서림, pp. 118-120, (2000)
- [2] "Aluminum and Aluminum Alloys", ASM, pp. 247-261, (1993)
- [3] "Forming and Forging", ASM, vol 14, pp. 241-254, (1988)
- [4] 일본단조기술연구소, "단조기술강좌", 과학기술, pp. 25-45, (2000)
- [5] 김영길, 이승석, 강윤수, 서기현, "인공결함을 이용한 공진 검사 시스템에 의한 펌프 피스톤의 결함 유무 판별", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 507-512, (2000)
- [6] 전만수, "AFDEX User's Manual Ver. 2.2", (주) 큐빅테크, (1998)
- [7] Dale Ensminger, "Ultrasonics", Second edition, Dekker, pp. 273-342, (1988)
- [8] Don E. Bray, Roderic K. Stanley, "Nondestructive Evaluation a Tool in Design, Manufacture and Service", McGraw Hill, pp. 101-141, (1997)
- [9] Paul McIntire, "Nondestructive Testing Handbook", Second edition, ASNT, (1991)