

주조아카데미

알루미늄 주조품의 잔류응력의 발생원인의 이해와 측정 기술

이은경 ¹⁾

한국해양대학교 해양신소재융합공학과

1. 서 론

알루미늄 합금은 가벼운 무게 특성으로 인해 다양한 분야에서 무게 감소를 위한 널리 사용되고 있다. 2010년 국립과학원 (National Academy of Sciences) 보고서에 따르면 자동차의 무게를 30% 감소시키면 연료 효율이 거의 20% 향상되는 것으로 나타나며, 이는 최근에 제안된 연료 효율 증가 방법 중에서도 가장 효과적인 것 중 하나로 꼽힌다.

특히, 얇은 벽과 복잡한 부품을 생산해야 하는 경우 다이 캐스팅 공정이 적용되며 이로 인해 다이 캐스팅의 설계와 생산에 높은 요구조건이 제기된다. 주요 특징으로는 높은 주입 속도, 높은 주입 압력, 짧은 주기 시간, 재사용 가능한 금속 다이의 사용, 얇은 벽 주조 설계, 우수한 표면 마무리 달성 가능성, 우수한 주조 기계적 특성, 치수 재현성 등이 있다.

이러한 다이 캐스팅 공정 중 알루미늄 합금 주조 부품은

기계적 특성, 치수, 잔류 응력 및 금속학적 상 변화를 겪는다. 이때, 잔류 응력은 주조 부품의 기계적 특성에 부정적인 영향을 미칠 때가 많다. 이는 주로 빠른 냉각 속도의 차이로 인해 발생하며, 냉각 속도의 차이, 단면 두께 및 재료 강도에 의존한다. 잔류 응력은 부품의 왜곡을 초래하며 추가 열 처리, 편지 및 열 처리가 필요한 합금으로의 교체와 같은 추가 공정 및 이로 인한 생산 비용을 증가시키게 된다. 따라서 잔류 응력의 예측, 평가 및 이해는 주조 부품의 물성 및 전체 완성도를 보장하기 위한 중요한 고려 사항이다.

본 글의 요지는 알루미늄 주조 부품의 잔류 응력을 예측하고 측정하며 알루미늄 주조에서 응력에 영향을 미치는 요인을 이해하는 것이 어떠한 의미가 있는지를 파악하는데 있다. 이에 잔류 응력의 원인을 설명하고, 프로세스 매개 변수에 대한 잔류 응력 연구, 측정 확인 및 신뢰성 요구에 대한 내용을 소개하고자 한다.

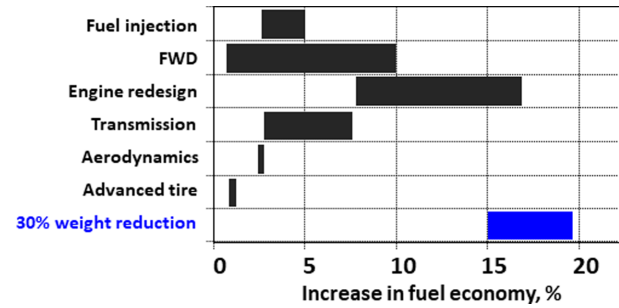


그림 1. 차량 연비 개선이 가능한 기술 [1].

2. 본 론

2.1 잔류응력 소개

잔류 응력은 기본적으로 열적 변형, 기계적 변형, 그리고 열적 변형과 소성변형이 함께 일어나는 현상에 의해 발생한다. 첫 번째로 열로 인해 발생하는 잔류 응력의 경우의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 주조품을 가열할시 표면 층의 부피 변화가 발생하게 되는데 이때, 부피를 줄이는 상변화가 발생하게 되면 표면층은 수축하려고 하지만 그 외의 부분은 이러한 수축에 저항하여 결과적으로 표면 층에 인장 응력이 발생한 상

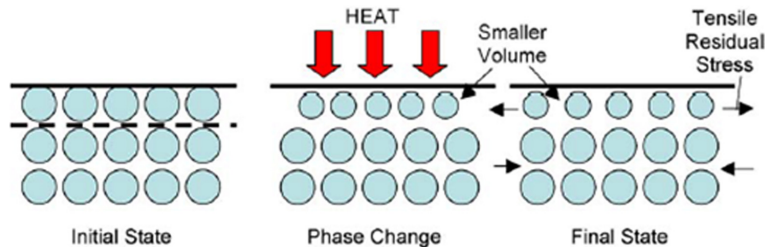


그림 2. 부품 표면에 유발된 잔류응력에 대한 열적 상변화의 영향 (Griffiths) [2].

¹⁾E-mail: elee@kmou.ac.kr

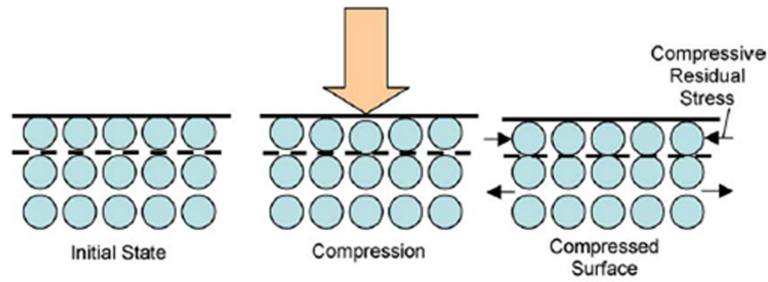


그림 3. 부품 표면에 유발된 잔류응력에 대한 기계적 변형의 영향 (Griffiths) [2].

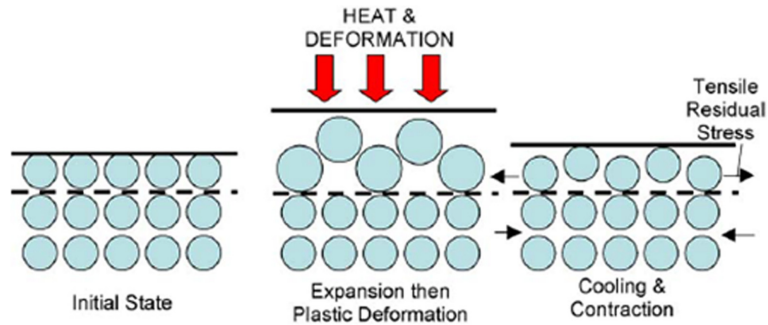


그림 4. 부품 표면에 유발된 잔류응력에 대한 열적, 소성 변형의 영향 (Griffiths) [2].

태로 존재하게 된다 (그림 2 참조).

만약 표면 층의 부피가 증가하는 경우, 예를 들어 강철을 질화 (Nitriding)하는 과정과 같이 원자의 내부 확산에 의해 부피 변화가 발생하는 경우, 재료의 이러한 인장응력 상태에 저항하려고 결과적으로 표면 층은 압축 상태로 존재하게 된다. 이와 비슷하게 기계적 변형에 의해 발생하는 잔류 응력은 직접적으로 재료의 표면을 압축응력 상태로 존재하게 하는 경우에 발생한다. 대표적으로 Shot peening 및 Burnishing 작업에서 발생하며 표면에 극심한 가열이 없으나 압축 잔류 응력을 띠고 있다.

열적 및 소성 변형에 의해 동반되는 잔류 응력은 주로 가공 작업에 의해 유발된다 [2,3]. 가공 작업에서 부품 표면을 가열하여 팽창시키면 이때 발생한 응력을 낮추기 위한 소성변형이 일어남으로써 어느 정도 해소된다. 그런 다음 표면에 가해졌던 열이 제거되면 첫 번째 경우와 같이 표면 층이 수축하게 되어 재료의 표면에서 인장 잔류 응력이 발생하며 그림 4에서 확인할 수 있다.

주조 부품의 잔류 응력은 부품이 몰드에서 제거된 후에 남아 있는 응력을 나타낸다 [4]. 이러한 잔류 응력은 재료 변형, 열 처리, 가공 공정과 같은 제조 공정 중에 발생하며, 이때 재료의 형태나 특성을 변화시키기 때문이다. 특히, 주조 공정 중 발생하는 잔류 응력의 주요 원인은 다음과 같다: (a) 주조 부품 내부의 온도 차이; (b) 몰드에 의한 수축 방해; 그리고 (c) 냉각 중에 고체 금속에서의 변화 [5,6] 또한, 주조품의 잔류응력을 발생시킬 수 공정과 이에 대한 상세한 과정은 그림 5에서 확인할 수 있다.

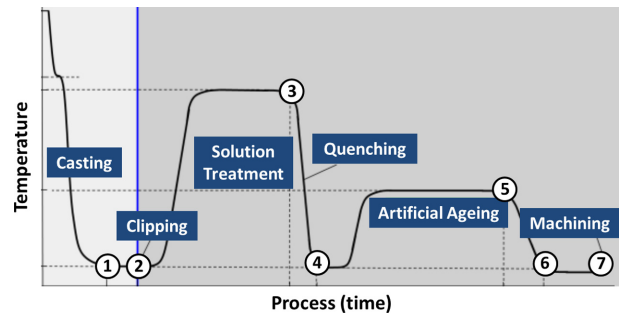


그림 5. 다이캐스팅 부품에 잔류 응력을 유발할 수 있는 주조 공정

- ① Casting: 응력과 변형 형성
- ② Clipping: 응력과 변형 재분배
- ③ Solution treatment: 응력 완화 (변형 형성)
- ④ Quenching: 변형, 응력 재형성
- ⑤,⑥ Artificial aging: 응력 완화, 그러나 완전한 응력 해제는 아닌 변형이 발생
- ⑦ Machining: 응력과 변형 형성

2.2 공정 변수와 잔류 응력 간 상관관계의 연구

주조 공정변수의 변화는 주조 부품에서 다른 유형과 크기의 잔류 응력을 유발할 수 있다. 주조 부품의 완벽성을 위해서는 잔류 응력에 영향을 미치는 요인을 이해하고 시뮬레이션 기술에 활용할 수 있는 데이터를 개발하는 것이 필요하다. 이러한 요인들에 의한 잔류응력의 변화를 이해하고자 하는 연구는 용접 분야에서 다소 수행되고 있지만 아직 다이 캐스팅 분야에서는 널리 이루어지지 않고 있는 실정이다. 잔류 응력 모니터

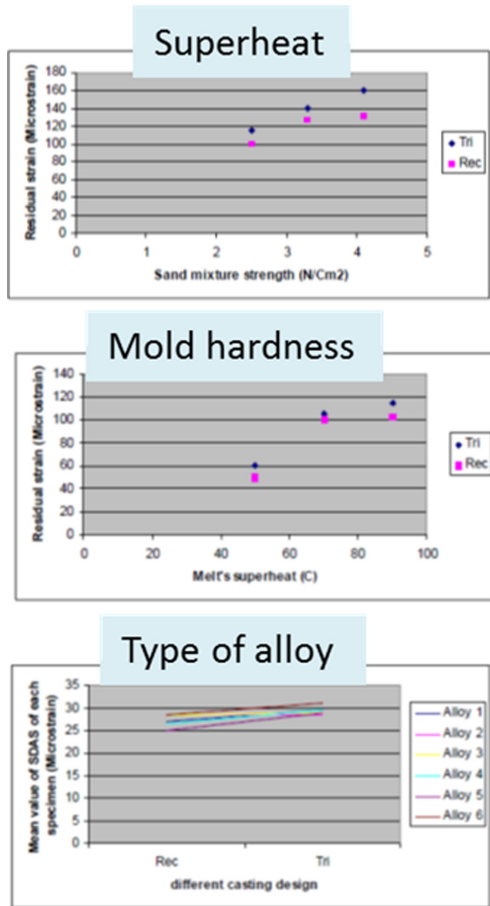


그림 6. 용융물의 superheat, mold hardness, and type of alloy가 잔류 응력에 미치는 영향 [7].

링은 극한 환경에서 작동하는 고성능 부품의 전반적인 제어와 유지에 매우 중요하며, 수명 주기에 미치는 영향이 크기 때문에 제조 과정 전체에서 잔류 응력의 발생과 상호 작용을 이해하는 것이 매우 중요하다.

예를 들어, S. Mohsen Sadrossadat의 연구진은 Al-Si-Mn 합금의 잔류 응력과 미세 구조에 주조 공정 변수가 미치는 영향을 조사하였다. 적용한 주조 공정 변수로는 eutectic modifier를 통한 조직 개량, superheat, 몰드 경도, 몰드 디자인 등을 고려하였다. 다양한 superheat, 몰드 경도, Al-10Sr로의 조직 개량, 두 가지 다른 주조 디자인을 통해 실험을 수행하였고 결과는 모든 주조 매개 변수가 잔류 응력에 명백한 영향을 미친다는 것을 보여주었다. superheat, 온도, 몰드 경도가 감소할수록 잔류 응력이 줄어든 것으로 나타났고, eutectic modifier의 추가나 주조 디자인의 변경은 잔류 응력을 증가시킨 것으로 확인되었다. 또한, 이러한 변수들이 미세 구조와 기계적 특성에 상당한 영향을 미친다는 사실을 밝혀내었다.

앞서 말했다, 용접 공정에서 변수가 잔류 응력에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다. 용접 공정은 열 팽창 및 응고시

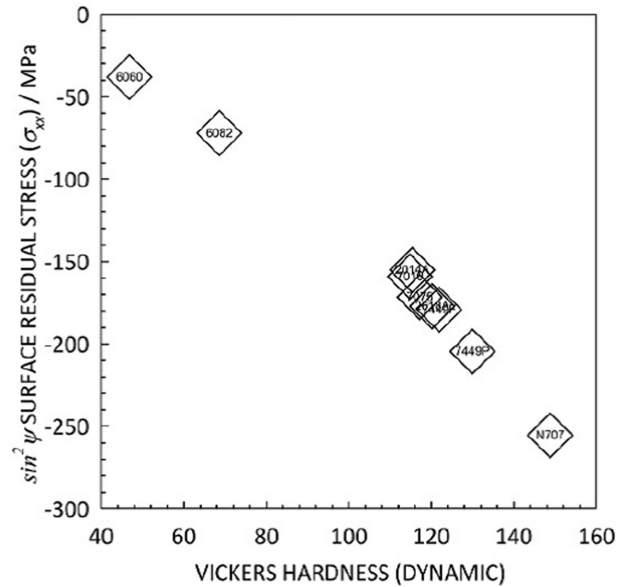


그림 7. The variation of the σ_{xx} component of residual stress measured on the large faces (160×50 mm) of the blocks using the $\sin^2\psi$ method compared to the as quenched hardness [13].

조직이 불균일하게 고체화되기 때문에 상당한 수준의 잔류 응력이 생성된다. Yashar Javadi 등의 연구에서는 피드 속도, 회전 속도, 핀 지름 및 shoulder 지름을 포함하는 다양한 용접 변수를 최적화하기 위해 통계적 실험 설계로서 Taguchi 방법을 활용하였다. 이 연구의 목표는 5086 알루미늄 판의 마찰교반 용접에 의해 생성된 잔류 응력을 최적화하는 것으로 결론적으로는 종 방향 잔류 응력 피크에 가장 큰 영향을 미치는 것은 피드 속도, 핀과 shoulder 지름은 그림 7에 표시된 대로 지배적인 영향을 미치지 않음을 확인하였으며 회전 속도 변화는 용접시 열의 주입을 변화시키므로 잔류 응력에 상당한 영향을 미쳤음을 확인하였다 [8].

미세 구조 변화의 관찰을 통해 알루미늄 화학 조성에 따른 잔류 응력에 대한 연구가 수행되었다. 석출 경화된 알루미늄에서 빠른 냉각을 적용시키면, 낮은 강도를 가진 균일한 과포화 고용체가 생성되고 이후 서브 마이크론 크기의 석출물로 형성되며 항복 강도를 크게 증가시킬 수 있다는 점은 1920년대 항공산업의 주목을 끌었다 [9,10]. 그러나 이러한 빠른 냉각은 잔류 응력을 발생시키는 결과를 초래할 수 있다. 냉각 과정에서 큰 열적 차이가 발생하며 이러한 열적 차이에서 발생하는 열적 응력을 완화하기 위해 불균일한 소성 변형이 동시에 발생하게 되면 재료에 높은 잔류 응력을 형성시킬 수 있다 [10]. 알루미늄 합금의 Semi-finished 가공 제품 (압출, 압연판 및 단조품)은 일반적으로 잔류 응력을 관리 가능한 수준으로 낮추기 위한 조건, 즉, 냉각 속도를 수정하거나 냉각 후 소성 변형을 적용시키기도 한다 [11,12].

알루미늄 합금에서 냉각 후 잔류 응력 크기 및 합금 조성,

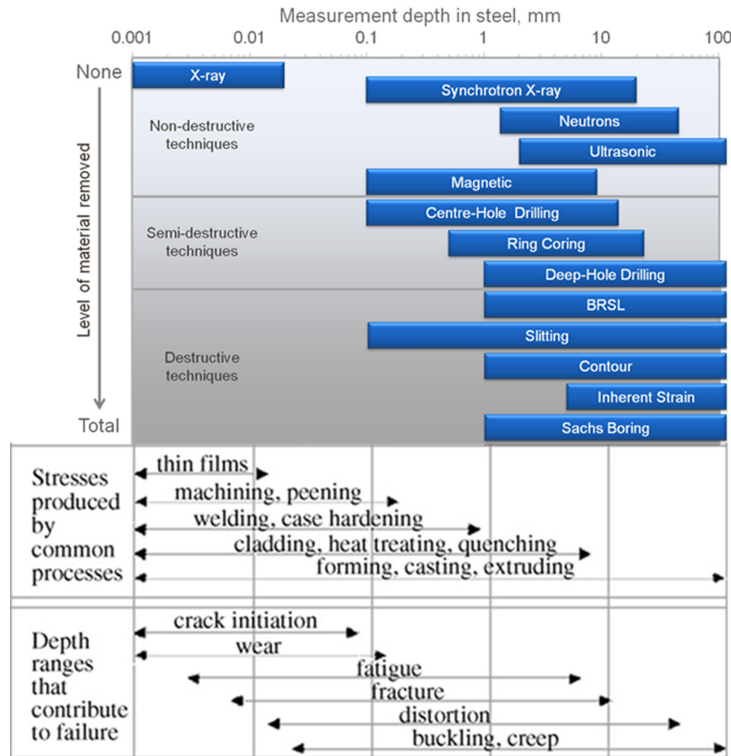


그림 8. 측정 길이, 침투, 파괴수준에 따른 잔류응력 측정 기술 [16,17].

강도와 같은 요소가 잔류 응력 크기에 미치는 영향에 대한 연구가 부족했던 이유로 J.S. Robinson 연구진은 열처리 가능한 여덟 가지 다른 알루미늄 합금의 냉각 후 특성이 잔류 응력 크기와 어떤 관계가 있는지 확인하였다. 표면 근처의 잔류 응력은 X선 회절을 사용하여 측정되었으며, 두께 방향의 잔류 응력은 중성자 회절을 사용하여 분석하였다. 이 연구에서는 다양한 강도 범위를 가진 합금을 선택하여 냉각후의 합금 강도가 잔류 응력 크기에 미치는 영향을 확인하였고, 합금 강도의 영향은 잔류 응력 크기에 변화를 나타냈으며, 표면 근처의 잔류 응력은 경도 및 강도와 선형 관계가 있는 것을 확인하였다 (그림 7 참조) [13].

2.3 잔류응력의 측정 방법

현재 항공우주, 원자력 및 기타 중요한 공학 분야에서 잔류 응력을 설계에 통합할 수 있는 기본 프레임워크를 개발하는데 상당한 노력이 기울여지고 있다. 잔류 응력 측정 기술은 다음과 같이 여러 가지가 있으며 일부는 파괴적이며, 다른 일부는 구성 요소를 크게 변경하지 않고 사용할 수 있다. 또한, 일부는 우수한 공간 해상도를 갖고 있으며, 다른 기술들은 표면 가까운 응력 또는 특정 재료 범주로 제한되어 있다. 이 장에서는 최근 개발된 기술 중 다이 캐스팅 공정에 적용 가능성이 있는 기술을 검토할 수 있다.

잔류 응력 측정 기술은 파괴적, 반파괴적 및 비파괴적이라는

세 가지 유형의 기술로 분류할 수 있다. 파괴 및 반파괴 기술, 또한 기계적 방법이라고도 하는데, 이러한 방법은 잔류 응력을 완전히 또는 일부 완화시키기 위해 재료의 일부분을 제거함으로써 원래의 응력을 추정하는 것에 의존한다. 이러한 방법들은 시편에서 재료를 제거함으로써 발생하는 변형을 측정함으로써 잔류 응력을 평가한다. 단면법, 등고선법, 홀 드릴링법, 링 코어법 및 딥홀법은 구조 부재에서 잔류 응력을 측정하는데 사용되는 주요한 파괴 및 반파괴 기술이다. 비파괴적 방법에는 X선 또는 중성자 회절, 초음파 및 자기 방법 등이 포함되며 이는 주로 응력과 관련된 어떤 매개변수를 측정한다. 이러한 기술들은 피로 관련 손상을 위한 중요한 도구로 사용되며, 많은 구조 부품 (예: 다리, 항공기 구조 또는 해상 플랫폼)은 정기적으로 검사되어 주요 손상 또는 고장을 방지해야 한다. 현장에서 또는 대형 구조물에서의 검사를 위해서는 작고 이동이 쉬우며 쉽게 다룰 수 있는 장비가 필수적이며 비용을 최소화하기 위해서는 시험 전에 부품을 준비하는 데 시간이 많이 소요되지 않아야 한다 [14,15].

잔류응력 측정기기가 특히 필요한 분야는 주철 및 강철을 포함한 금속과 알루미늄, 티타늄, 마그네슘 합금 및 니켈 기반 합금 또한 요구되는 분야이다. 또한 금속, 고분자 및 세라믹과 같은 모든 종류의 복합 재료에 대한 측정이 매우 요구되고 있다. 잔류 응력은 특히 구성 요소 상의 열팽창 계수가 매우 다른 경우 중요한 문제로 다루어지는데, 이로 인해 큰 잔류

응력이 발생하여 기계적 특성 및 성능에 중대한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 산업에서의 잔류응력 측정에 대한 요구 사항은 측정 방법, 제조 및 조립 문제, 그리고 성능에 따라 구분될 수 있으며 이 중 일부는 아래와 같다.

- 서로 다른 회절 방법 간의 상호 상관관계, 측정 신뢰성 및 해석에 대한 추가 연구가 필요하며 다양한 상황에서 특정 수준의 잔류 응력의 영향의 분석이 필요
- ASTM 홀 드릴링 표준 신뢰성 관련 우려
- 표면 및 부재의 잔류 응력의 비파괴적 측정을 위한 새로운 기술 개발 필요
- 회절 방법의 유효성 검증에 대한 연구 필요
- 소성 변형 매핑을 통한 잔류응력 측정 방안 확장에 대한 요구
- 정밀 광학 코팅 및 기관에서의 비파괴적 잔류 응력 측정

및 신뢰성 확보에 대한 요구

3. 결 론

알루미늄 주조품 내의 잔류 응력 형성은 주로 주조 과정 중 다양한 요인으로부터 비롯되며 이러한 변수들 간의 복잡한 상호 관계가 응력 발생에 기여하고 있음을 이해하는 것이 중요하다. 효과적으로 잔류 응력을 분석하고 평가하기 위해 해당 분야에서 여러 고급 도구와 기술이 사용되고 있으나 아직 많은 제한 및 요구가 존재하고 있다. 이 분야에서의 추가적이며 깊이 있는 연구 개발은 다양한 산업 분야에서 적용될 수 있으며 주요 주부품의 무결성과 이를 통한 안전성을 보장하는데 기여할 것으로 기대된다.

표 1. 잔류응력 측정기술 비교 [18].

Technique	Advantage	Disadvantage
X-ray diffraction	Ductile Generally available Wide range of materials Hand-held systems Macro and Micro RS	Lab-based systems Small components Only basic measurements
Hole Drilling	Fast Easy use Generally available Hand-held Wide range of materials	Interpretation of data Semi destructive Limited strain sensitivity and resolution
Neutron Diffraction	Macro and Micro RS Optimal penetration & resolution 3D maps	Only specialist facility Lab-based system
Barkhausen Noise	Very quick Wide sensitive to Microstructure effects especially in welds Hand-held	Only ferromagnetic materials Need to divide the microstructure signal from that due to stress
Ultrasonic	Generally available Very quick Low cost Hand-held	Destructive Interpretation of data Limited strain resolution
Sectioning	Wide range of material Economy and speed Hand-held	Destructive Interpretation of data Limited strain resolution
Contour	High-resolution maps of the stress normal to the cut surface Hand-held Wide range of material Larger components	Destructive Interpretation of data Impossible to make successive slices close together
Deep hole drilling	Deep interior stresses measurement Thick section components Wide range of material	Interpretation of data Semi destructive Limited strain sensitivity and resolution
Synchrotron	Improved penetration & resolution of X-rays Depth profiling Fast Macro and micro RS	Only specialist facility Lab-based systems

참고문헌

- [1] National Academy of Sciences. (2010).
- [2] Griffiths, B. Surface Integrity & Functional Performance, Manufacturing Engineering Modular Series, Taylor & Francis, (2001).
- [3] Smith, G.T. Industrial Metrology—Surfaces and Roundness, Springer, (2001).
- [4] Withers, P.J. and H.K.D.H. Bhadeshia,, Materials Science and Technology, **17**(4) (2001) 355.
- [5] Parkins, R.N., Cowan, A., Proc. Inst. Brit. Found., 1953 A99.
- [6] T.S.32, R.o.s.-c. 1952: Proc. Inst. Brit. Found., A179- A189.
- [7] Mohsen Sadrossadat, S.J. The effects of casting parameters on residual stresses and microstructure variations of an Al-Si cast alloy. in Advances in X-Ray Analysis (2009) Denver, Colorado, USA: International Centre for Diffraction Data (ICCD).
- [8] Javadi, Y., S. Sadeghi, and M.A. Najafabadi, Materials & Design,, **55** (2014) 27.
- [9] J.W.Martin, “Precipitation Hardening: Theory and Applications”, Butterworth Heinemann, Oxford, UK (1998).
- [10] Myer, R.T., "Stress-relief of aluminium for aircraft", Metal progress, **3** (1959) 112.
- [11] Altschuler, Y., ASTM STP, **993** (1988) 19.
- [12] Nickola, W.E., ASTM STP, **993** (1988) 7.
- [13] Robinson, J.S. and W. Redington, **105** (2015) 47.
- [14] Rossini, N.S., et al., Materials & Design, **35** (2012) 572.
- [15] Lachmann C, N.-P.T., Wohlfahrt H. Non-destructive characterization of fatigue processes in cyclically loaded welded joints by the Barkhausen noise method, Stanford University, (1999).
- [16] <https://commons.wikimedia.org>.
- [17] J.E. Wyatt, J.T.B., A.R. Williams, Journal of Mater. Proc. Tech., 191 (2007) 170.
- [18] Mujeebulla Khan Guttal, A. Sharief, Materials Science, TECHNOLOGY Experimental Techniques to find Thermal Residual Stress in Composite Materials -A study of the Literature Review (2014).