

열처리된 SA508 합금에서의 초음파 비선형성 측정: 결정립과 석출물 영향

Ultrasonic Nonlinearity Measurement in Heat Treated SA508 Alloy: Influences of Grains and Precipitates

백승현*, 이태훈*, 김정석*, 장경영**†

Seunghyun Baek*†, Taehun Lee*, Chungseok Kim* and Kyung-Young Jhang**

초 록 본 연구에서는 합금강의 미세조직 특성인 결정립과 석출물이 초음파 비선형성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 원자로 압력용기 재료인 SA508 Gr.3 저합금강을 오스테나이트화 및 템퍼링 조건을 변화시켜 모상의 오스테나이트 결정립 크기와 석출물 크기를 제어하였다. 결정립과 석출물 모두 크기가 조대해 짐에 따라 초음파 비선형 파라미터는 낮아지는 경향을 보이므로 초음파 비선형성이 결정립과 석출물과 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있었다. 모상의 오스테나이트 결정립이 성장하더라도 패킷과 래스 하부입계의 영향으로 초음파 비선형 파라미터는 큰 변화를 보이지 않았다. 석출물의 영향으로 석출물의 크기 외에 정합변형을 일으키는 Mo₂C의 감소로 인해 초음파 비선형 파라미터가 큰 감소를 나타내었다. 본 연구결과 초음파 비선형성을 측정함으로써 결정립과 석출물의 미세조직 특성을 평가하는 것이 가능하다.

주요용어: 초음파 비선형 파라미터, 결정립, 석출물, SA508 Gr.3

Abstract In the present study, the influences of grains and precipitates of microstructural evolution on the ultrasonic nonlinearity have been experimentally investigated. The prior-austenite grain and precipitate size are controlled by the variation in austenitizing and tempering conditions in reactor pressure vessel materials of nuclear power plant, SA508 Gr.3 low alloys. The ultrasonic nonlinearity was found to have strong correlations with grains and precipitates since the ultrasonic nonlinear parameter β shows decrease trend with coarsening of grains and precipitates. Although the prior-austenite grain size increased, the β changed little due to the effects of subgrains, packets and laths. For the precipitate effects, the β decreased sharply due to decrease in Mo₂C causing the coherency stain in addition to the precipitate size. The results in this study may provide a potential for characterizing the microstructural evolution, grains and precipitates, by measuring the ultrasonic nonlinearity.

Keywords: Ultrasonic Nonlinear Parameter, Grains, Precipitates, SA508 Gr.3

1. 서 론

열처리된 금속 또는 합금에 요구되는 기계적, 물리적 성질, 즉 강도, 경도, 내마모성, 가공성, 자성 등의 제반 특성을 부여하기 위한 목적으로 가열과

냉각을 하는 기술이다. 하지만 열처리 후에도 재료는 끊임없는 정적, 동적 및 복합적인 하중뿐만 아니라 고온에서 장기간 사용되기 때문에 그에 따른 안전은 보장할 수 없는 실정이다. 현재 이에 대한 대책으로 시설물에 대한 정기적인 진단과 노후화된

부분의 보수 또는 교체가 이루어지고 있다. 하지만, 안타깝게도 현 기술로는 구조물이 가동 중인 경우, 재료 표면의 손상 정도를 찾아내고 예측하는 것은 가능하나 재료 내부의 구조적 결함이나 열화 정도를 정확하게 진단하기 위해서는 시료를 채취하여 직접 파괴 시험을 하는 방법이 신뢰도가 높다. 그만큼 경제적이고 효율적인 교체시기를 결정하는 것에 있어 많은 어려움이 뒤따른다. 이에 대한 대안으로 가동 중인 구조물에 영향을 미치지 않고 해당 재료의 상태 거동 및 손상 정도를 정량적으로 모니터링할 수 있는 기술로 비파괴 검사 기술이 주목받고 있다[1,2]. 비파괴 검사 기법 중에서도 초음파를 이용한 재료의 특성 평가는 초음파의 선형적 특성, 즉 초음파속도, 감쇠 및 후방산란 등을 이용하여 소재의 손상평가와 잔여수명 예측을 위해 활발하게 연구가 진행되어왔다[3,4]. 더욱이 초음파의 비선형성을 이용하여 최근에는 보다 정밀한 미시적 손상 평가가 가능하게 되었다[5-10].

고체 재료내부를 전파하는 초음파의 비선형적 특성은 전위, 석출물, 피로균열 등 재료 내 미시적 결함을 평가하는데 널리 이용되고 있다. Breazeale은 구리 단결정에 중성자조사를 시킴으로써 구리격자 자체의 격자뒤틀림을 야기하고 이에 따른 초음파의 비선형적 거동을 연구하였다[11]. 그리고 Hikata는 알루미늄 단결정을 연구하였고 인장응력이 증가함에 따라서 재료내부에 발달된 전위밀도의 증가가 초음파의 비선형성을 증가시킴을 보고하였다[12]. Cantrell은 T4 열처리된 알루미늄 2024에서 피로변형 동안 생성된 전위쌍극자가 재료 내를 전파하는 초음파를 왜곡시킴으로써 비선형파라미터가 지속적으로 증가함을 보고하였다. 또한, 열처리온도에 따른 석출물의 생성과 소멸과정을 비선형파라미터 측정을 활용하여 평가하였다[13]. Hurley는 탄소첨가량에 따른 마르텐사이트강에서 초음파 종파속도와 비선형파라미터의 변화를 설명하였다. 탄소첨가량에 따른 초음파의 속도 변화는 나타나지 않았으나 비선형 파라미터는 탄소첨가량에 따라서 크게 증가하였다. 이는 탄소첨가량의 증가에 따라서 전위밀도가 증가함에 기인하는 것이다[14]. 이렇듯 초음파의 비선형특성은 재료내의 원자단위결합에서부터 전위와 석출물 등 격자변형을 일으켜 응력-변위특성의 비선형적 거동을 충분히 크게 하여 전파하는 초음파의 왜곡(wave distortion)을 야기하는데 있다. 본 연구에서는 피로 손상에

국한되었던 기존 연구와는 달리 상용 재료의 열처리에 따른 재료 거동을 분석하고자 하였다. 결정립의 비선형 의존성에 대해서는 아직까지 연구된 바 없었기에 상업용 원자로 압력용기에 사용되고 있는 SA508 저합금강의 품질 열처리 조건 중 오스테나이트와 템퍼링 조건을 변화시켜 모상의 오스테나이트 결정립크기와 석출물크기를 제어하고, 이에 따른 미시구조적 변화와 초음파 비선형 특성간의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시험 시편

시편은 상업용 원자로 압력 용기 재료로 널리 사용되는 Mn-Mo-Ni에 저합금강(SA508 Gr.3)이며 오스테나이트와 템퍼링 조건을 변화시켜 모상의 오스테나이트 결정립과 석출물의 크기를 제어하였다. 원자로 재료 중 반응압력용기는 원자로 반응장치의 수명과 안정성을 결정하는데 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 이러한 압력용기용 재료는 고온과 고압 그리고 중성자조사라는 극한 환경에서 사용되므로 여러 가지 다양한 조성의 강종으로 활발하게 개발이 되고 있다. 그중에서 퀘칭-템퍼링 Mn-Mo-Ni 강으로 SA508은 최근 가장 널리 사용되는 원자로용 압력용기강재라 할 수 있다. 사용한 시편은 직육면체 형상인 10×15×30 mm로 제작하였으며 화학적 조성은 Table 1과 같다. 모든 시편은 열처리 후 표면산화물과 거칠기를 최소화하기 위해서 연마지 #200, #600, #1200, #2000를 이용하여 표면처리를 하였다. 열처리 조건은 각 시편마다 다르게 준비되었고 Table 2에 나타낸 바와 같이 균질화 처리를 위해 시편마다 880℃에서 8시간 노말라이징, 그리고 660℃에서 8시간 템퍼링을 동일하게 수행하였다. 균질화 처리된 시편은 모상의 오스테나이트 결정립제어를 위해 880℃ (H1), 960℃ (H4), 1000℃ (H5)에서 각각 6시간 열처리를 하였다. 또한, 결정립크기 제어 후 석출물 제어를 위해 템퍼링을 660℃에서 각각 10시간 (H1), 30시간 (H2), 50시간 (H3)시간 열처리하였다. 이상 열처리에 의한 정량적인 미세조직 및 기계적 물성의 변화는 Table 3과 같다. 결정립과 석출물 크기 제어의 기준이 되는 H1에서의 평균 구오스테나이트 결정립 크기는 25 μm이고 오스테나이트 온도에 따라서 결정립의

Table 1 The chemical composition of SA508 Gr.3

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu
0.21	0.24	1.36	0.007	0.002	0.92	0.21	0.49	0.022	0.03

Table 2 Heat treatment of SA508 Gr.3

	Normalizing	Tempering	Austenitizing	Tempering
H1	880℃/8h	660℃/8h	880℃/6h	660℃/10h
H2	880℃/8h	660℃/8h	880℃/6h	660℃/30h
H3	880℃/8h	660℃/8h	880℃/6h	660℃/50h
H4	880℃/8h	660℃/8h	960℃/6h	660℃/10h
H5	880℃/8h	660℃/8h	1000℃/6h	660℃/10h

Table 3 Heat treatment result of SA508 Gr.3 (wt.%)

Material	H1	H2	H3	H4	H5
Ave.grain size(um)	25	24	20	60	110
Ave.carbide size(um)	0.20	0.26	0.29	0.21	0.21
Aspect ratio	2.00	1.80	1.75	2.13	2.03
Fracture toughness (MPam ^{0.5})	88.3	49.1	49.2	84.3	89.5

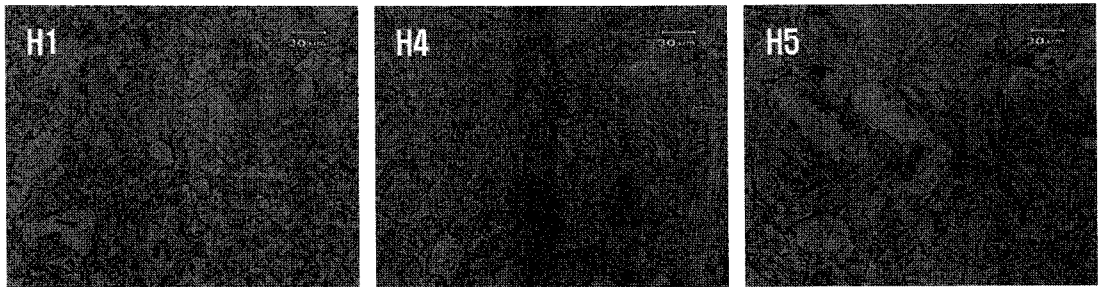


Fig. 1 Optical microscopy images of SA508 Gr.3 with heat treatment : (a) Austenitizing 880℃/6h (H1), (b) Austenitizing 960℃/6h (H4), (c) Austenitizing 1000℃/6h (H5)

크기는 크게 증가하였다. 석출물 크기 역시 템퍼링 시간의 증가에 따라 변화였으며 초기 0.2 um에서 50h 열처리 후 0.29 um로 조대화 되었다. 파괴 인성치는 오스테나이트의 결정립 크기에 따라 미비한 변화를 나타내어 결정립 크기 의존성을 보이지 않았다. 하지만 석출물의 구상화 및 조대화로 인해서 파괴 인성치는 감소하였다. 이는 취성 파괴가 일어나는 전이영역에서의 파괴인성은 결정립의 크기보다는 탄화물의 크기 분포에 크게 의존한다는 기존 보고와 유사한 것으로 판단된다[15]. Fig. 1은 결정립 크기 제어에 대한 대표적인 표면 미세조직을 광학 현미경으로 관찰한 사진이다. 전형적인 상부베이나이트 조직으로 미세한 래스 경계와 패킷 외에

구오스테나이트 결정립 조대화가 명확하게 관찰되었다. 석출물의 경우 열처리 온도 및 시간에 따라 석출물 크기가 증가함은 수많은 선행 연구자들을 통해 확인되었다. 특히, Raj는 퀸칭과 템퍼링을 통한 강의 미세 구조 특성 연구에서 본 연구의 열처리와 같은 템퍼링 지속 시간 증가는 석출물의 크기 증가와 관련됨을 보고하였다[16].

2.2. 초음파 비선형 특성 계측 장비 구성

초음파 비선형성 계측을 위한 측정 시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 장비는 높은 인가전압의 튜버스트 파 발생이 가능한 RAM5000을 사용하

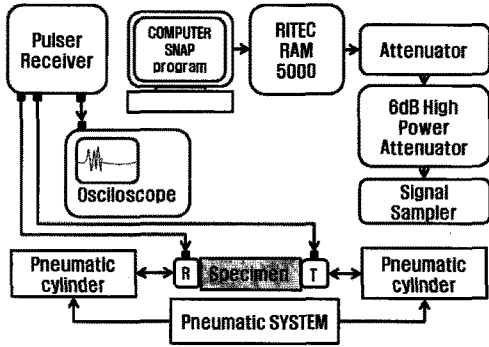


Fig. 2 Experimental system for measurement of ultrasonic nonlinear parameter

여 송수신하였으며 송신에는 직경이 0.375인치, 협대역 밴드폭 (-6 dB: 70%)을 갖는 중심 주파수 5 MHz인 압전형 탐촉자를 사용하였고 수신에는 2차 고조파성분의 수신 효율을 선택적으로 향상시키기 위해 직경은 0.375인치, 협대역 밴드폭 (-6 dB: 46%)인 10 MHz 압전형 탐촉자를 사용하였다. 안정된 시험이 가능하도록 시편과 탐촉자간의 접촉압력 조절 및 음축 미세조정 기능을 갖추었다[17,18].

3. 실험결과

3.1. 결정립 크기 변화에 따른 비선형 특성 변화

오스테나이트 온도가 증가함에 따라서 모상의 오스테나이트 결정립은 조대화 된다. 따라서 본 연구에서 준비한 H1, H4, H5는 오스테나이트 온도가 각각 880°C, 960°C, 1000°C로 다르고 템퍼링 조건 (660°C, 10시간)이 동일하므로 이상의 세 시편으로 결정립 크기가 초음파 비선형성에 미치는 영향을 연구하였다. Fig. 3는 각 시편에서 측정된 비선형파라미터를 인가전압의 차이에 따라 나타내었다. 인가전압에 의한 효과는 크지 않았고 초음파 비선형파라미터는 H1에서 약 0.034이었다. 오스테나이트 온도가 증가하여 960°C인 H4에서는 미소한 증가를 나타내었다. 이에 반해 오스테나이트 온도 1000°C인 H5는 초음파 비선형파라미터가 현저하게 감소하였다. 이러한 현저한 감소는 미세조직적으로 여러 원인이 있겠지만 오스테나이트 열처리를 통한 결정립크기 제어 효과가 지대할 것으로 사료된다.

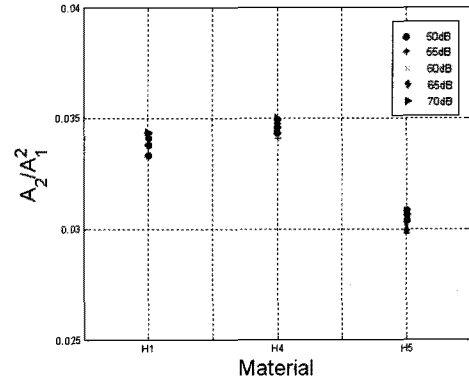


Fig. 3 Nonlinear parameter at each austenitizing condition with induced voltages

본 연구에 사용한 SA508 저합금강은 상부베이나이트구조의 복잡한 미세구조를 갖고 있다. 특히, 계면결합(boundary defect)으로는 다양한 경계들이 존재를 한다. 먼저 전위구조중의 하나인 래스는 전위의 하부구조로 하부입계(subgrain)라고 불리며 강도에 미치는 영향이 결정립과 유사한 역할을 하는 것으로 생각되어진다[19]. 이들은 인접 래스간에 미소한 결정방위차를 갖고며 경계에는 구조적 전위가 밀집된 구조라 할 수 있다. 이보다 더 큰 경계로는 패킷이 존재한다. 이들은 래스보다도 더 큰 결정방위차를 갖고며 아직은 고경각입계를 형성하지 못한다. 그리고 마지막으로 오스테나이트 결정립계가 존재한다. 이 오스테나이트 결정립계는 소재의 기계적인 특성 즉, 강도와 인성 등에 미치는 영향이 지대하므로 매우 중요한 요인이 된다. 다결정재료 내에서 결정립계란 몇 개정도의 원자크기만한 폭을 갖는 구역이다. 일반적으로 결정학적 방위는 한 결정립에서 인접한 다른 결정립으로 지날 때 갑자기 변하게 된다. 고경각입계는 인접해 있는 결정격자들간에 무질서한 불일치가 존재하는 것으로 인접 격자간 방위차가 약 15°이상 차이나는 곳을 결정립계라고 한다. 이들은 부동전위인 입계전위들로 구성되어 있다. 게다가 입계레지(grain boundary ledge)는 효과적인 전위 생성원으로 작용한다. 결정립계는 상대적으로 매우 높은 계면표면에너지를 갖는다. 따라서 이들은 확산과 상변태 그리고 석출 등과 같은 고체상태 반응에 대한 우선지역으로 작용하기도 한다. 이렇듯 결정립계의 높은 계면 에너지로 인해서 결정립 내부에서 보다는 입계에서 보편적으로 고용원소의 농도가 훨씬 높게 된다. 이러한 불순물의 편

석작용으로 인해 결정립계에 의한 순수 기계적인 특성에 미치는 영향을 분리하기가 매우 어렵게 된다. 외부로부터의 응력이 작용할 경우 결정립에서의 변형을 역시 입계와 입내는 서로 상이한 구배를 갖는다. 이상에서 설명한 바와 같이 결정립계는 입내보다도 높은 계면에너지와 높은 전위밀도 그리고 인접 결정립과의 높은 방위차를 가지므로 결정립계는 재료 내에서 국부적인 변위를 증가시키며 재료 내를 전파하는 초음파를 충분히 왜곡시키게 된다. 결정립이 조대화 됨에 따라서 동일체적당 차지하는 결정립계의 체적분율은 작아질 것이다. 결국 재료 내부를 초음파가 전파할 경우 결정립 크기가 조대화 되면 결정립의 크기가 작을 때와 비교하여 상대적으로 초음파의 왜곡이 작아지고 따라서 초음파 비선형파라미터는 작아질 것이다.

이러한 이유로 Fig. 3과 같이 조대한 결정립에서 비선형 파라미터가 낮은 것으로 판단된다. 하지만 이상에서 열거한 바와 같이 상부베이나이트조직을 갖는 SA508 저합금강은 다양한 계면을 갖고 또 입계가 복잡한 구조를 가지므로 단순히 결정립 크기만의 효과를 분리하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 점은 Fig. 1에서와 같이 H1과 H4에서는 매우 밀집된 래스와 패킷 계면들이 존재하며 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 추후 다양한 조건에서 초음파 비선형성에 미치는 결정립계의 영향을 연구할 필요가 있다고 하겠다.

3.2. 석출물 크기 변화에 따른 비선형 특성 변화

템퍼링 시간이 증가함에 따라서 노말라이징과 템퍼링에 의해 발달한 초기 석출물, 오스테나이트 열처리로 인한 재용해와 석출열처리에 의한 석출물의 생성, 그리고 시간에 따른 석출물의 조대화와 재용해 등 다양한 석출물의 변태과정이 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서 준비한 H1, H2, H3은 템퍼링 시간이 각각 660°C에서 10시간, 30시간, 50시간으로 세 시편에 대해서 석출물의 정도가 초음파 비선형성에 미치는 영향을 연구하였다. Fig. 4는 각 시편에서 측정된 비선형파라미터를 인가전압의 차이에 따라 나타내었다. 초음파 비선형파라미터는 H1에서 약 0.034이었다. 템퍼링시간이 30시간으로 증가한 H2에서는 변화가 미비하고 큰 변화가 없어 보인다. 그리고 템퍼링시간이 50시간으로 증가한 H3에서는 초음파 비선형파라미터가 현저하게 감소하

였다. 이러한 현저한 감소는 템퍼링 온도와 시간에 따른 재료 내 석출물의 변태와 성장거동과 큰 관련이 있는 것으로 사료된다.

본 연구에 사용한 Mn-Mo-Ni강인 SA508 Gr.3 저합금강은 상부베이나이트구조의 복잡한 미세구조를 갖고 있다. 특히, 대표적으로 막대상의 시멘타이트(Fe₃C), 침상의 Mo₂C, 미세침상의 Ksi-carbide(Fe₂MoC) 등 열역학 적으로 안정한 여러 종류의 석출물이 존재하게 된다[20]. 이들은 고유한 핵생성 에너지를 가지므로 서로 다른 상변태 거동을 갖게 된다. 시멘타이트의 경우 약 700°C까지, Mo₂C는 약 600°C까지 안정한 상이며 Ksi-carbide는 고온상으로 600°C~750°C에서 안정하다. 따라서 880°C 오스테나이트 열처리시 존재하는 모든 석출물들은 기지내부로 모두 재용해되었을 것으로 판단된다. 그리고 다시 660°C 템퍼링시 열역학적으로 안정상인 Fe₃C, Mo₂C와 Fe₂MoC가 존재하게 된다. 이들 석출물들은 일반적으로 베이나이트와 페라이트 경계에는 막대형의 시멘타이트와 페라이트, 래스 내부에는 막대형과 구석출시멘타이트가 그리고 미세 침상의 석출물인 Mo₂C와 Ksi-carbide가 높은 밀도로 분포하게 된다. 조대한 시멘타이트는 기지격자와 부정합 관계를 갖는데 반해서 미세 Mo₂C와 Ksi-carbide는 준정합의 관계를 가지므로 석출물과 기지격자간에 큰 정합변형을 일으키게 된다[21]. 그리고 템퍼링 시간이 증가함에 따라서 페라이트기지에 존재하던 Mo₂C는 템퍼링온도 660°C에서 안정상이 아니므로 기지로 급격하게 재용해되며 일부는 Ksi-carbide로 상변태가 일어날 것으로 생각된다. 그리고 이러한 정합 석출물들은 SA508 저합금강의 기계적인 강도에 큰 기여를 하게 된다.

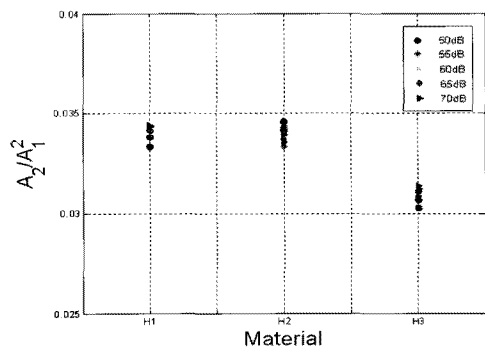


Fig. 4 Nonlinear parameter at each tempering condition with induced voltages

석출물이 초음파 비선형성에 미치는 영향은 일찍이 단결정재료 혹은 단순금속재료를 통해서 연구되어져왔다. 이러한 석출물은 주로 불균일 핵생성을 하고 기지격자와의 격자상수 차로 인한 원자적 일치(atomic matching) 관계에 따라서 석출물과 기지간에는 불일치(misfit)가 존재하게 된다. 이러한 불일치가 존재하므로 석출물과 기지 간에 격자비틀림 현상이 일어나고 격자변형이 생기게 된다. 따라서 재료 내에는 국부적인 석출물과 기지격자간에 작용하는 격자변형은 전파하는 초음파를 충분히 왜곡시키게 되고 이로 인해서 비선형성을 증가시키게 된다[22].

이러한 이유로 Fig. 4와 같이 템퍼링시간이 증가함에 따라서 660°C에서 안정상이 아닌 준정합의 Mo₂C는 기지로 급격하게 재용해되며 일부는 Ksi-carbide로 상변태가 일어나게 된다. 이렇게 기지격자와 정합의 관계를 갖고 있는 Mo₂C의 급격한 감소는 기지격자와 석출물간의 격자변형 정도를 감소시키며 격자변형의 회복을 일으키게 된다. 결국 재료 내에 국부적인 변위를 감소시키고 이에 따라 재료 내를 전파하는 초음파의 왜곡현상 역시 감소시키게 된다. 따라서 초음파 비선형파라미터는 감소하게 된다. 하지만 석출물의 영향도 이상에서 열거한 바와 같이 상부베이나이트조직을 갖는 SA508 저합금강은 미세조직적으로 복잡한 구조를 가지므로 단순히 석출물만의 효과를 분리하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한, 템퍼링으로 인한 어닐링효과로 전위회복을 일으킬 수 있으므로 추후 폭넓은 조건에서 상용금속재료의 석출물이 초음파비선형성에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다고 하겠다.

4. 결론

초음파의 비선형성에 대한 결정립의 영향은 결정립의 크기가 클수록 비선형 파라미터가 낮았다. 이는 결정립계가 입내보다도 높은 계면에너지와 높은 전위밀도 그리고 인접결정립과의 높은 방위차를 가지므로 결정립계는 국부적인 변위를 증가시키며 재료 내를 전파하는 초음파를 왜곡시키기에 충분하기 때문이다. 템퍼링 시간이 증가함에 따라 석출물의 영향으로 초음파 비선형성은 감소하였다. 이는 템퍼링 시간이 증가함에 안정상이 아닌 준정합의 Mo₂C는 기지로 급격하게 재용해되어 기지격자와 석출물간의 격자변형 정도를 감소시키기 때문이다.

이상의 결과로부터 초음파 비선형성에 미치는 결정립과 석출물의 영향을 고찰하였고 압력용기강인 SA508 Gr.3 저합금강의 미세조직적 변화를 실험적으로 평가하였다. 하지만 선형적인 상부베이나이트조직을 갖는 SA508 Gr.3저합금강은 미세조직적으로 복잡한 구조를 가지므로 단순히 결정립의 크기와 석출물크기 및 분포만의 효과를 분리하는 것은 어려운 일이므로 추후 폭넓고 다양한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후기

본 연구를 위해서 시편을 제공해 주신 한국원자력연구원의 정용무 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018195)

참고문헌

- [1] 김경조, 장경영, Y. Hisashi, "초음파 비선형 전파특성을 이용한 부분 열화 재료의 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 25, No. 2, pp. 214-219 (2001)
- [2] C. S. Kim, I. K. Park, K. Y. Jhang and N. Y. Kim, "Experimental characterization of cyclic deformation in copper using ultrasonic nonlinearity," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 3, pp. 285-291 (2008)
- [3] 이태훈, 장경영, "초음파의 비선형 특성을 이용한 미세균열 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 28, No. 4, pp. 352-357 (2008)
- [4] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation," Journal of Applied Physics, Vol. 81, No. 7, pp. 2957-2962 (1997)
- [5] K. Y. Jhang, "Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548 (2000)
- [6] C. Bermes, J. Y. Kim, J. Qu and L. J. Jacobs, "Experimental characterization of

- material nonlinearity using Lamb waves", *Applied Physics Letters*, Vol. 90, Issue 2, pp. 021901-021901-3, (2007)
- [7] 김정석, 박익근, "석출물과 전위에 기인한 초음파 비선형성 파라미터", *한국정밀공학회지*, Vol. 25, No. 7, pp. 131-138, (2008)
- [8] 남태형, 최성호, 장경영, 김정석, 이태훈, "협대역 레이저 여기 표면파의 음향비선형성을 이용한 Al6061 합금의 굽힘피로손상 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 2, pp. 139-145 (2010)
- [9] D. J. Barnard, "Variation of nonlinearity parameter at low fundamental amplitudes," *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 17, pp. 2447-2449 (1999)
- [10] J. Y. Kim, A. Baltazar and S. I. Rokhlin, "Ultrasonic assessment of rough surface contact between solids from elastoplastic loading - unloading hysteresis cycle," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 52, Issue 8, pp. 1911-1934 (2004)
- [11] W. B. Gauster and M. A. Breazeale, "Ultrasonic measurement of the nonlinearity parameters of copper single crystals," *The American Physical Society*, Vol. 168, No. 3, pp. 655-661 (1998)
- [12] A. Hikata, B. B. Chick and C. Elbaum, "Dislocation contribution to the second harmonic generation of ultrasonic waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, Issue 1, pp. 229-236 (1965)
- [13] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, Supplement 1, pp. 487-490 (2001)
- [14] D. C. Hurley, D. Balzar, P. T. Purtscher and K. W. Hollman, "Nonlinear ultrasonic parameter in quenched martensitic steels," *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, No. 9, pp. 4584-4588 (1998)
- [15] 양원준, 이봉상, 김민철, 홍준화, 허무영, "베이 나이트계 저합금강의 천이온도영역에서 취성 파괴에 미치는 결정립 크기의 영향 고찰", *대한금속·재료학회지*, Vol. 41, No. 11, pp. 855-862 (2003)
- [16] V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 171, Issue 1-2, pp. 179-189 (1997)
- [17] I. H. Lee, D. S. Son, I. H. Lee, T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Development of pressure control system of contact transducer for measurement of ultrasonic nonlinear parameter," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 6, pp. 576-581 (2007)
- [18] 최익황, 이재익, 권구도, 장경영, "접촉식 탐촉자를 이용한 초음파 비선형 파라미터의 측정에서 시스템에 의존하는 고조파 성분의 영향", *비파괴검사학회지*, Vol. 28, No. 4, pp. 358-363 (2008)
- [19] V. L. Safonov and H. N. Bertram, "Magnetization reversal as a nonlinear multimode process," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, Issue 8, pp. 5072-5075 (1999)
- [20] B. J. Lee, H. D. Kim and J. H. Hong, "Calculation of α/γ equilibria in SA508 grade 3 steels for intercritical heat treatment," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 29A, No. 5, pp. 1441-1447 (1998)
- [21] H. H. Jin, C. S. Shin, D. H. Kim, K. H. Oh and J. H. Kwon, "Evolution of a needle shaped carbide in SA508 Gr. 3 steel," *ISIJ International*, Vol. 48, No. 12, pp. 1810-1812 (2008)
- [22] R. D. Peters and M. A. Breazeale, "Ultrasonic measurement of the temperature dependence of the nonlinearity parameters of copper," *The American Physical Society*, Vol. 1, Issue 8, pp. 3245-3250 (1970)