

장시간 등온열화된 AISI316 오스테나이트강의 초음파 비선형성

Ultrasonic Nonlinearity of AISI316 Austenitic Steel Subjected to Long-Term Isothermal Aging

공원식*, 김정석*†

Won-Sik Gong* and ChungSeok Kim*†

초 록 본 연구는 고온강도와 화학적 안전성으로 산업기계 구조물의 주요 소재로 사용되고 있는 AISI316 오스테나이트기 스테인레스강의 장시간 등온열처리에 따른 초음파 비선형성 특성을 평가하였다. 장시간 등온열처리는 정해진 시간을 변수로 전기로에서 가속열처리를 수행하였다. 미세조직적으로 정밀분성을 통하여 장시간 열처리에 따른 초음파 비선형성의 변화와 미세적 손상거동을 면밀히 평가하였다. 초음파 비선형성은 1000시간까지 급격하게 감소하고 이후 서서히 감소하였다. 표면조직적으로 입계의 모양이 다각형에서 원형으로 변하며 특히, 1000시간에서는 쌍정이 모두 분해되었다. 입계에 존재하던 델타페라이트는 1000시간에서 관찰되지 않으며 σ 상으로 지속적인 변태가 진행되었다. 결과적으로 열처리 초기에는 보이드나 전위의 소멸 그리고 쌍정의 소멸로 초음파 비선형성은 급격히 감소를 하고 이후에는 입계에 $Cr_{23}C_6$ 석출물의 생성과 σ 상 생성으로 초음파 비선형성은 미소하지만 지속적으로 감소한 것으로 판단된다.

주요용어: 스테인레스강, 초음파 비선형성, 열처리, 미세조직

Abstract This study presents the ultrasonic nonlinearity of AISI316 austenitic stainless steels subjected to long-term isothermal aging. These steels are attractive materials for use in industrial mechanical structures because of their strength at high-temperatures and their chemical stability. The test materials were subjected to accelerated heat-treatment in an electrical furnace for a predetermined aging duration. The variations in the ultrasonic nonlinearity and microstructural damage were carefully evaluated through observation of the microstructure. The ultrasonic nonlinearity stiffly dropped after aging for up to 1000 h and, then, monotonously decreased. The polygonal shape of the initial grain structures changed to circular, especially as the annealing twins in the grains dissolved and disappeared. The delta ferrite on the grain boundaries could not be observed at 1000 h of aging, and these continuously transformed into their sigma phases. Consequently, in the initial aging period, the rapid decrease in the ultrasonic nonlinearity was caused by voids, dislocations, and twin annihilation. The continuous monotonic decrease in the ultrasonic nonlinearity after the first drop resulted from the generation of $Cr_{23}C_6$ precipitates and σ phases.

Keywords: Stainless Steel, Ultrasonic Nonlinearity, Heat Treatment, Microstructure

1. 서 론

산업설비의 상태진단이나 수명평가에 있어서 구조 건전성 모니터링에 대한 관심과 노력이 집중되고 있다. 하지만 구조 건전성 모니터링은 결합 검출, 위치, 크기, 신호처리, 검출시스템 등과

관련한 진단(diagnosis)과 물리기반 해석과 열화, 통계, 파손, 수명해석 등의 예측(prognosis), 그리고 무선, 에너지, 전자기기, 컴퓨터 등의 통합기술(integrative technologies)의 종합적인 분석을 통해서 보다 성공적으로 수행되게 된다. 이러한 여러 산업기술들의 유기적인 융합이 절대적이지만

현재까지는 부족함이 크다. 따라서 보다 심화되고 종합적인 관련기술의 융합 연구가 절실한 실정이다. 하지만 우선적으로 다양한 첨단 비파괴 기법을 이용하여 구조물의 열화를 정밀하게 검출할 수 있는 기법은 매우 중요한 구조 건전성 모니터링의 요소기술이라고 할 수 있다. 이러한 첨단 비파괴기법 중 기존의 초음파 속도, 감쇠, 산란 등을 이용하는 전통적인 선형 초음파기법과는 다르게 재료가 갖는 비선형적 특성을 초음파를 이용하여 매우 정밀하게 측정함으로써 재료의 미세한 변질을 평가하는 것이 가능하게 되었다 [1-3].

Cantrell은 초음파 비선형성에 대한 석출물과 전위의 영향을 수학적으로 매우 심도 있게 연구를 하였다. 그는 마르텐사이트 스테인레스강에서 피로손상 정도에 따라 초음파 비선형 파라미터가 증가함을 보고하였으며 알루미늄 2024에서의 피로변형동안 전위쌍극자가 생성되며 그로 인해 재료 내를 전파하는 초음파의 왜곡 정도가 심해져 초음파 비선형 파라미터가 지속적으로 증가한다고 보고하였다[4,5]. Jhang은 비선형 계측에 대한 여러 측정 변수의 영향과 오차 원인 규명 등 정밀계측기법을 심도 있게 보고하고 있다. 또한, 전통적인 종파투과기법을 극복한 새로운 초음파 모드를 이용한 유도초음파, 표면파 그리고 레이저를 이용한 비접촉 초음파의 비선형성 연구를 보고하고 있으며 전위와 석출물 외에 결정립, 균열 등의 영향을 보고하였다[6,7].

본 연구에서는 고온의 기계적 및 화학적 안정성으로 기계구조물에 널리 사용되고 있는 오스테나이트기 스테인레스 강 of 장시간 열처리에 따른 미세변질을 초음파 비선형성을 측정하여 평가하고 다양한 분석법을 통하여 그 관련성을 규명하고자 하였다. 이를 위해서 AISI316강을 전기로에서 장시간 열처리를 통해 다양한 미세적 변화를

갖는 열처리 시편을 제작하고 투과법을 통해 초음파 비선형성을 측정하였다. 초음파 실험후 시험편의 일부를 가공하여 미세조직 분석을 수행하였다.

2. 실험

2.1. 실험 시편

본 실험에서 사용한 오스테나이트기 스테인레스강은 원자력발전소의 일차 시스템인 원자로 압력용기(reactor pressure vessel, RPV)에 사용된다. 시편의 화학적 조성은 Table 1과 같으며 준비된 스테인레스 316 오스테나이트강 시편에 대한 정성적이고 정량적인 원소 분석 결과를 나타내었다. 원소 분석은 주기율표 상의 대부분의 원소분석이 가능하고 sub-ppm수준의 높은 감도와 넓은 정량농도 분석이 가능한 유도결합플라즈마 (inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)를 이용하였다. 시험편은 총 5단계로 하여 전기로에 600°C의 온도로 각각 0시간, 10시간, 100시간, 1,000시간, 5,000시간, 10,000시간 열처리를 가하여 장시간 인공열화 시켰다. 초기 열화시험 전 기계적 물성은 Table 2에 나타냈다.

2.2. 실험 방법

장시간 열화된 시편의 미세조직을 관찰하기 위하여 현미경 관찰을 하였다. 시험편은 열화시편 으로부터 기계가공을 통해 8 mm × 8 mm크기로 절단 후 마운팅 수지를 이용하여 저온 마운팅을 하여 준비하였다. 관찰 표면은 연마지를 사용하여 80번에서 2000번까지 스크래치가 생기지 않도록 주의 깊게 기계연마한 후 입자 직경이 1 μm 인 알루미늄아세이트를 차례로 이용하여 연마하

Table 1 Chemical composition of AISI316 stainless steel

(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Ti	Nb	N	Fe
0.002	0.35	1.58	0.032	0.001	2.47	10.82	17.41	0.43	0.06	0.001	0.02	-	Bal

Table 2 Mechanical properties of AISI316 stainless steel

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Hv
AISI 316	464	597	25	201

었다. 최종 연마는 1 μm 입자의 다이아몬드현탁액을 이용하여 경면으로 준비하였다. 연마면은 화학에칭을 이용하여 표면부식을 하였고 부식액은 (ethanol 100 ml + HCl 5 ml + picric acid 4g) 용액으로 상온에서 약 20초 정도 담그고 부식시킨 뒤 깨끗이 세척하여 광학현미경(optical microscope, OM)의 명시야상으로 관찰하였다. 또한, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 미세조직의 형상 및 석출물의 분포를 보다 면밀하게 관찰하였다. 광학현미경 관찰과 동일한 방법으로 최종 시편을 준비하고 주사전자현미경을 이용하여 이차전자(secondary electron, SE) 그리고 원소 분석을 위해서 에너지분산분광기(energy dispersive spectroscopy, EDS)을 수행하였다.

열화시간에 따른 각 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 경도시험을 수행하였다. 경도시험은 시편을 8 mm \times 8 mm 그리고 두께를 5 mm로 기계가공하고 표면을 연마지 80번에서 2000번까지 스크래치가 생기지 않도록 주의 깊게 기계연마한 후 입자 직경이 1 μm 와 0.3 μm 인 알루미나 페이스트를 차례로 이용하여 최종 연마하였다. 경도시험은 ASTM E384규격에 준하여 시편당 10번 측정을 하고 각 압흔 간의 거리는 압입에 의한 표면소성변형 영향을 무시할 정도로 압흔 직경의 5배 이상 떨어진 지점에서 다음의 압흔에 대한 경도를 측정하였다. 정밀한 경도측정을 위해서 미소비커스경도시험기(Shimadzu, HMV-FA)를 사용하였다. 시험 중 압입하중은 1 kg으로 하중시간은 10 s로 하였다.

AISI 316강은 오스테나이트기 스테인레스강으로 기지는 오스테나이트상을 이루며 구조적으로 면심입방정을 갖는다. 또한 일반적으로 용해 주조시에 형성된 델타페라이트가 입계에 존재하게 된다. 이러한 결정상과 구조의 변화를 관찰하기 위해서 X선 회절분석을 수행하였다. X선 회절기(Rigaku, X'pert PRO MPD)를 이용하여 20도에서 90도까지 스캔 간격은 0.1도로 유지시간 1s로 2 θ 스캔으로 수행하였다. X선은 $\text{CuK}\alpha(\lambda=1.54056)$ 타겟 조건으로 튜브 전압 40 kV, 전류 30 mA로 설정하였다.

오스테나이트 입계에 존재하는 델타페라이트의 분율을 측정하기 위해서 페라이트스코프를 사용하였다. 페라이트스코프는 자기유도방법에 따라 측정한다. 코일에 의해 발생된 자기장은 시험체

의 자기 성분과 상호작용하고, 자기장의 변화는 2차코일 내에 페라이트 성분에 비례하는 전압 변화를 일으킨다. 이 전압을 평가하여 페라이트 성분을 측정하게 된다. 이 페라이트스코프(Fischer, MP-30E)를 사용하여 각각의 시험편에 10회 측정하였다.

초음파 비선형성 계측을 위한 측정 시스템은 높은 인가전압의 톤버스트 파 발생이 가능한 고출력 송수신 시스템(Ritec, RAM5000SNAP)을 사용하여 송수신하였으며 송신에는 직경 0.375in, 협대역 밴드폭(-6 dB: 70%)을 갖는 중심주파수 5 MHz 인 압전형 탐촉자를 사용하였고, 수신에는 2차 고조파 성분의 수신 효율을 선택적으로 향상시키기 위해 직경 0.375in, 협대역 밴드폭(-6 dB: 46%)인 10 MHz 압전형 탐촉자를 사용하였다. 물리적으로 초음파의 절대 비선형 파라미터(β)는 측정된 기본 주파수 성분의 변위(A_1), 이차 고조파 성분의 변위(A_2)와 투과중파의 파수 그리고 전파거리를 이용하여 나타낸다[8]. 특히, 본 연구에서는 기본주파수, 전파거리 그리고 계인을 일정하게 유지하여 절대비선형 파라미터에 비례하는 상대적 초음파 비선형 파라미터 $\beta' = \overline{A_2}/\overline{A_1}^2$ 를 정의하고 초음파 비선형성(ultrasonic nonlinearity)으로 하였다. 여기서 $\overline{A_1}$ 은 초음파 신호에 대한 주파수 분석결과 기본주파수 성분의 진폭이고 $\overline{A_2}$ 는 2차 고조파 성분의 진폭이다[9]. 초음파 실험을 위한 시험편은 25 \times 20 \times 20 mm로 기계가공하고 초음파의 전파거리는 시편의 길이방향으로 25 mm로 정하고 표면은 화학연마를 하여 준비하였다.

3. 실험결과 및 논의

측정된 초음파 비선형성 결과는 Fig. 1과 같다. 열처리 초기 시간에 AISI 316의 초음파 비선형성이 급격하게 감소하였다. 급격하게 감소 후 1000시간 이후부터는 단조롭지만 지속적인 감소를 나타내었다. 10000시간 열처리 후 열처리 전과 비교하여 약 33% 감소하였다.

고온에서 안정적이고 또한 화학적 분위기에서 안전하다고 잘 알려진 오스테나이트기 스테인레스 316 강도 고온에서 장시간 열처리를 할 때 Fig. 1에 보여진 바와 같이 기본 주파수의 진폭과 이차고조파의 진폭비로 나타낸 초음파의 비선

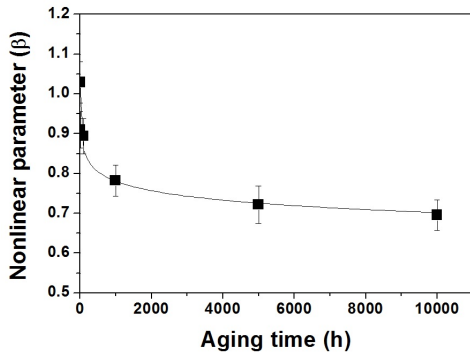


Fig. 1 The variation in ultrasonic nonlinearity as a function of aging time

형성이 시간에 따라서 감소하였다. 특히, 1000시간까지 급격하게 감소하며 이후 서서히 감소함을 보였다. 초음파 비선형 파라미터의 변화를 보다 정밀하게 그 원인을 미세조직적으로 관찰하기 위해서 다양한 미세조직적 분석을 수행하였다. 먼저 열화시험편에 대한 표면 구조를 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 광학현미경은 금속의 표면 조직을 가시광선을 이용하여 결정립이나 조대한 결정상들을 관찰할 수 있다. Fig. 2는 열화시험편의 표면조직을 광학현미경의 명시야상이미지로 관찰한 결과이다. 열처리 전 초기에는 결정립들이 다각형의 형태를 보이고 매우 많은 어닐링 쌍정은 대부분의 결정립들에서 관찰되었다. 그리고 입계의 계면 상에 어두운 부분으로 보이는 델타페라이트도 관찰되었다. 이들은 주조와 압연의 공정 과정에서 생성된 어닐링쌍정과 델타페라이트이다. 100시간의 열화동안 결정립계들이 더욱 분명히 관찰되고 결정립내 쌍정들이 약간 감소해 보인다. 또한 결정립의 모양이 다각형 형태에서 보다 구형상으로 변한 결정립들도 다수 관찰되었다. 1000시간의 열화 후 결정립 내에 존재하던 어닐링쌍정은 모두 사라지고 입계면에 검게 존재하는 델타페라이트의 영역이 보다 확대되어 관찰되고 결정립의 모양은 이제 거의 구형의 형태를 갖게 되었다. 이후 10000시간의 열화에서는 더욱 결정립은 구형화가 진행되었고 결정립의 크기 변화는 관찰되지 않았다. 또한, 열화가 진행됨에 따라서 입계 석출물인 Cr₂₃C₆의 석출이 진행되었다 [10]. 이상과 같은 미세조직적인 변화를 정량적으로 평가하여 Table 3에 나타내었다.

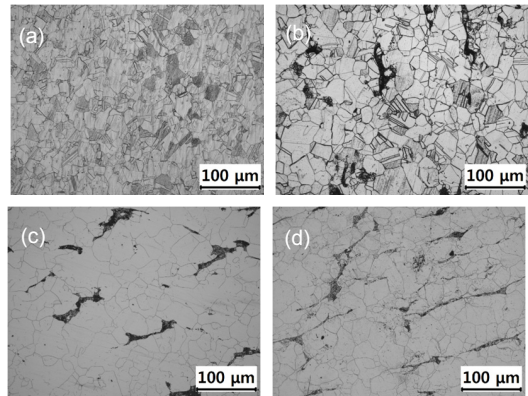


Fig. 2 The optical micrographs of typical surface microstructures subjected to long-term aging; (a) 0 hr, (b) 100 hrs, (c) 1000 hrs and (d) 10000 hrs

Table 3 Microstructural evolution of AISI316 steel

Aging (h)	Twin fraction (%)	grain size (μm)	Aspect ratio
0	63	56	0.56
100	60	55	0.60
1000	0	55	0.61
5000	0	62	0.63
10000	0	59	0.64

쌍정분율은 전체 결정립당 쌍정을 포함하는 결정립의 개수로 하여 약 1000여개의 결정립에 대해서 정량화를 하였다. 결정립의 크기는 이미지 분석기를 통해서 약 700개의 결정립에 대해 측정하고 이들에 대한 장축과 단축의 비를 이용하여 형상비를 나타내었다. 이 형상비가 1이 되면 완전 원형을 의미한다. Fig. 2에서처럼 쌍정은 100시간까지 존재하고 1000시간에서는 모두 분해되어 관찰되지 않았다. 그리고 결정립의 크기는 조대한 결정립이 증가하고 또한 미소한 결정립도 증가하여 산술적으로는 평균 결정립의 크기가 유사하게 나타나 평균 결정립의 크기 변화는 관찰하지 못했다. 결정립의 형태는 현저하게 관찰되었고 초기의 다각형 형태의 결정립의 모양은 매우 급격하게 구형화가 진행되었다. Fig. 3은 결정립의 크기를 정량화한 결과를 대표적인 시편에 대해서 나타내었다. 결정립의 크기 히스토그램에서처럼 평균 이하 수십 마이크로 크기의 결정립

의 개수도 증가하였고 또한 평균 이상의 조대한 결정립의 개수도 증가한 것으로 나타났다. 비록 이들의 산술평균에 의해서 평균 결정립의 크기가 변화를 없어 보이지만 장시간 열처리로 인해 재결정화와 결정립 성장 등으로 미소결정립의 증가와 조대 결정립의 증가가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 장시간 등온열화처리 시간에 따른 미소경도의 변화를 나타내었다. 열처리 초기에 급격한 경도의 감소를 나타내고 100시간 이후에는 다시 증가하였다. 주조와 가공으로 도입된 공공이나 전위 등의 격자 결함들은 열처리로 인해서 초기에 소멸하게 된다. 이들은 고체내 결정격자의 왜곡을 일으키기에 충분하다. 또한, Fig. 2의 표면 조직을 관찰한 바와 같이 결정립들에 존재하는 쌍정 그리고 입계에 존재하던 델타페라이트가 소멸과 변태과정을 보이면서 이들이 격자의 왜곡에 대한 회복을 가속시켜 내부변형이 감소하고 이로써 경도가 감소한 것으로 판단된다. 100시간 이후에 다시 경도가 증가하는 것은 결정립계에 존재하던 델타페라이트가 매우 경하고 취성의 성질이 강한 시그마상으로 변태가 진행됨에 따라서 나타난 것으로 생각된다[11].

Fig 5는 각각의 시험편에 대해 X선 회절분석을 수행하고 0시간과 10000시간에 대한 대표적인 회절결과를 나타내었다. 결과에서처럼 0시간에서는 기지인 오스테나이트뿐만 아니라 델타페라이트의 회절선도 관찰되어 이는 Fig. 2에서 현미경으로 관찰한 결과와 일치하고 있다. 하지만 10000시간 등온열 화처리된 시편에서는 델타페라이트의 회절선이 관찰되지 않아 X선 회절분석으로 측정이 되지 않았다. 델타페라이트의 정량적인 분석을 위해서 현미경 분석과 페라이트스코프를 이용하여 측정하고 이를 Table 4에 나타내었다. 현미경 관찰에서는 열처리 시간에 따라서 델타페라이트가 증가한 결과를 보였다. 하지만 페라이트스코프의 측정 결과 열처리 시간에 따라서 점차 감소하고 5000시간과 10000시간에서는 매우 작은 값을 나타내어 측정을 ± 0.25 정도의 오차를 고려하면 무시할 정도로 작은 값을 나타내었다. 이는 X선 회절분석으로 측정한 결과와 매우 유사한 결과를 나타내었다. 하지만 현미경을 이용한 측정은 콘트라스트를 기본으로 하기 때문에 결정립계에 존재하는 델타페라이트와 시그마상을 구별하

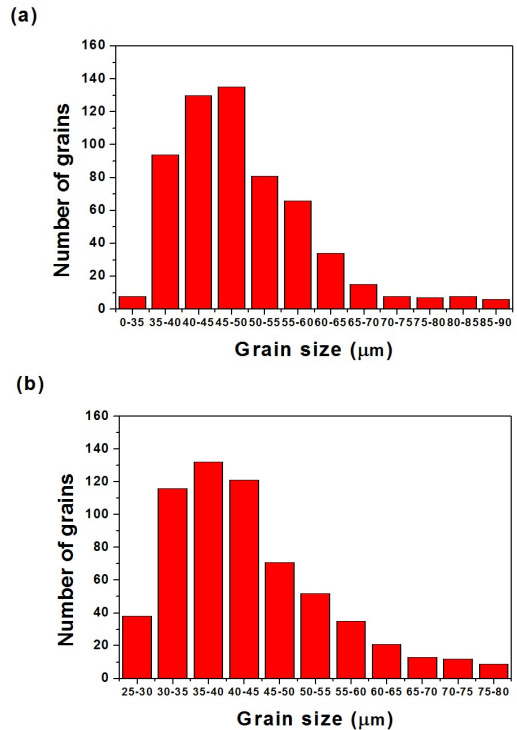


Fig. 3 Histogram of grain size at each aging time of AISI316; (a) 0 hr and (b) 10000 hrs

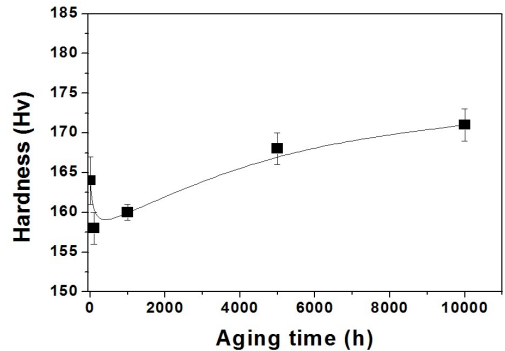


Fig. 4 Variation in hardness as a function of aging time

Table 4 Characterization of delta ferrite fraction (%)

Aging (h)	SEM	Ferrite scope	XRD
0	2.8	1.95	3.2
100	2.7	1.8	2.4
1000	3.2	1.0	0
5000	3.1	0.7	0
10000	3.8	0.5	0

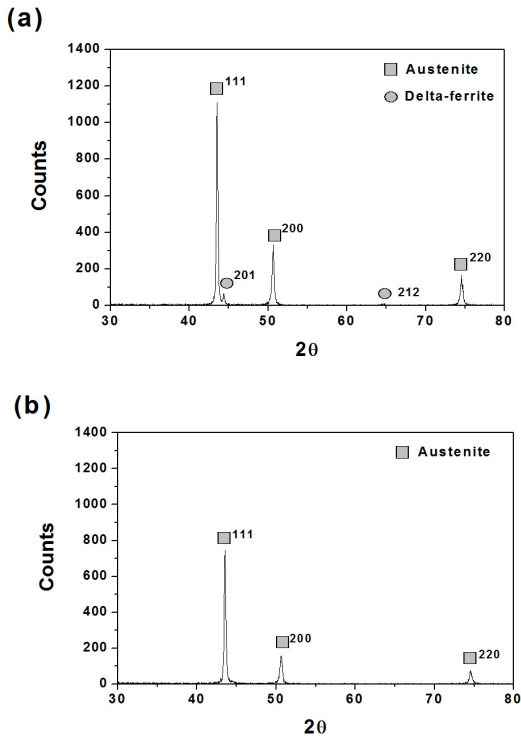


Fig. 5 XRD patterns at each aging time; (a) 0 hr and (b) 10000 hrs

는 것이 불가능해서 나타난 결과로 판단되며 시간에 따라서 시그마상이 변태되고 생성되므로 콘트라스트로만 측정된 결과 증가한 것으로 과대평가될 수 있다.

본 연구에서 초음파 비선형성은 등온열화 초기 약 1000시간까지 급격하게 감소하여 초기 대비 약 24% 감소하였다. 이는 열처리에 의한 어닐링 효과로 공공이나 전위들의 소멸 등과 관련한 회복 현상으로 결함에 의해 격자 일그러짐이 회복되면서 초음파의 전파시 격자에 의한 초음파의 왜곡 정도가 감소하므로 초음파 비선형성은 급격하게 감소하게 된다. 이후에도 초음파 비선형성이 미소하지만 단조로이 감소하는 것은 입계에 존재하던 델타페라이트가 시그마상으로 변태를 하고 입계에 안정상인 $Cr_{23}C_6$ 인 크롬 석출물이 증가하면서 기지에 고용되었던 크롬의 현저한 고갈 현상을 초래한다. 따라서 격자왜곡을 주도했던 크롬이 시그마상과 석출물로 빠져나오면서 격자왜곡이 감소하게 된다. 따라서 초음파 비선형성 역시 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고온의 기계적 및 화학적 안정성으로 기계구조물에 널리 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인레스 강의 장시간 열처리에 따른 미세변질을 초음파 비선형성을 측정하여 평가하고 다양한 분석법을 통하여 그 관련성을 규명하고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 초음파 비선형성은 등온열화 초기에 급격한 감소를 나타내고 이후 단조롭지만 지속적인 감소를 나타내었다. 이는 열처리에 따른 재료 격자 왜곡의 회복의 결과에 기인하게 된다.
- 2) 등온열화처리 시간의 증가에 따라서 초기시간에는 결정립 내에 존재하는 쌍정이 소멸하고 결정립의 모양은 다각형 형태에서 구형으로 진행되었다.
- 3) 결정립계에 존재하는 델타페라이트는 등온열화 시간에 따라서 시그마상으로 변태가 진행되고 결정입계에는 입계석출물인 $Cr_{23}C_6$ 석출물이 생성되었다. 따라서 미소경도는 열처리 시간에 따라서 증가하였다.

이상과 같이 장시간 등온열화처리로 열화된 오스테나이트계 316 스테인레스강은 열처리에 따라서 격자결함의 소멸과 상 변태와 석출물의 생성으로 인해서 초음파 비선형성은 초기에 급격하게 감소하고 이후 단조로운 감소를 나타낸 것으로 판단된다. 결과적으로 고온 등온열화에 대한 미시적 재료손상을 초음파 비선형 특성을 이용하여 평가하는 것이 유효한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2013R1A1A1010152).

참고문헌

- [1] C. Pruell, J. Y. Kim, J. Qu and L. J. Jacobs, "Evaluation of plasticity driven material damage using Lamb waves," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, 231911 (2007)
- [2] C. Inserra, V. Tournat and V. Gusev, "Char-

- acterization of granular compaction by non-linear acoustic resonance method," *Applied Physics Letters*, Vol. 92, 191916 (2008)
- [3] J. H. Cantrell, "Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel on fatigue damage accumulation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, 063508 (2006)
- [4] J. H. Cantrell and X. G. Zhang, "Nonlinear acoustic response from precipitate-matrix misfit in a dislocation network," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, pp. 15-18 (1998)
- [5] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 487-490 (2001)
- [6] H. Lee, C. Chung, C. S. Kim and K. Y. Jhang, "Fully non-contact assessment of acoustic nonlinearity according to plastic deformation in Al6061 alloy," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 4, pp. 388-392 (2012)
- [7] C. S. Kim, I. K. Park and K. Y. Jhang, "Long-term aging diagnosis of rotor steel using acoustic nonlinearity," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 6, pp. 642-649 (2011)
- [8] D. C. Hurley, D. Balzar and P. T. Purtscher, "Nonlinear ultrasonic assessment of precipitation hardening in ASTM A710 steel," *Journal of Materials Research*, Vol. 15, No. 9, pp. 2036-2042 (2000)
- [9] C. S. Kim, T. H. Nam, S. H. Choi and K. Y. Jhang, "Assessment of plastic deformation in Al6061 alloy using acoustic nonlinearity of laser-generated surface wave," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 32, No. 1, pp. 20-26 (2012)
- [10] L. P. Stoter, "Thermal ageing effects in AISI type 316 stainless steel," *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 1039-1051 (1981)
- [11] K. Nakata, S. Ikeda, S. Hamada and A. Hishinuma, "Microstructural development due to long-term aging and iron irradiation behavior in weld metals of austenitic stainless steel," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 233-237, pp. 192-196 (1996)