

스테인리스강 진공용기 제작 공정중 투자율 변화 측정

홍만수* · 박종도

포항가속기연구소, 포항 790-784

(2010년 8월 24일 받음, 2010년 10월 21일 수정, 2010년 10월 28일 확정)

방사광 가속기 저장링 진공용기의 주요 소재로 사용되고 있는 스테인리스강 304, 316L의 투자율(Magnetic Permeability) 변화를 측정하여, 비자성 재료가 요구되는 응용 분야에서 활용가능한지 살펴보았다. 투자율은 용접, 굽힘 등 진공용기 제작 과정에서 크게 상승하였으나, 제작 후 고용화 열처리 공정을 거친다면 상대투자율 1.02 이하가 요구되는 분야에서 사용가능함을 알 수 있었다.

주제어 : 투자율, 진공용기, 스테인리스강, 용접, 열처리

I. 서 론

방사광 이용자의 증가와 양질의 빔을 제공하기 위하여 전 세계적으로 다수의 방사광 가속기가 신설되고 있거나 기존의 장치를 개조하고 있다 [1-5]. 방사광 가속기의 저장링 진공시스템은 저장된 입자들이 "빔-잔류기체 산란"으로 손실되는 것을 최소화하여 빔수명을 가능한 오랫동안 유지하도록 운용된다 [6,7]. 최근의 저장링 진공시스템의 건설은 보다 간단하고 소형으로 제작하는 경향이 있다. 이렇게 함으로써 빔운전에 따른 열부하 변동 효과를 최소화하고 따라서 고품질의 방사광을 안정적으로 제공할 수 있도록 하고 있다.

가속기용 진공용기의 재료로는 스테인리스강, 알루미늄합금, 구리 또는 티타늄 등이 있으나 스테인리스강, 알루미늄합금이 주로 사용되고 있다 [1-4]. 스테인리스강은 알루미늄합금과 함께 내부식성이 좋고 기체방출률도 작아서 진공재료로 널리 쓰이고 있다. 이들 재료는 초기 산화막이 재빨리 만들어지며, 이 산화막이 표면 화학반응을 방해하여 산화가 더 이상 잘 진행되지 않는다. 알루미늄합금은 용접과 상용 스테인리스강과 접합이 상대적으로 어려운 단점이 있으나, 가볍고, 열전도도가 크고, 가공성이 뛰어나며, 낮은 온도에서 탈기체 처리(bakeout)를 쉽게 할 수 있다. 또한 알루미늄합금은 완전한 비자성체이고 잔류방사능이 작아 특히 가속기 분야에서 오래 전부터 사용되어오고 있다 [8]. 이에 비해 스테인리스강은 매우 낮은 기체방출률을 가지며 [9] 열전도도가 상대적으로 작아서 열변형 효과가 작

다는 장점이 있다. 여기에 스테인리스강은 기본적으로 낮은 투자율을 갖는 비자성체 재료로 알려져 있지만, 용접 등 제조과정에서 투자율이 상승하게 되어 더 이상 비자성 재료라 할 수 없게 된다. 특히 가속기에서 입자 진행의 통로가 되는 진공용기는 여러 종류의 자석 사이에 설치된다. 이때 진공용기의 자기적 특성에 의해서 자기장에 오차를 주게 되어 그 결과로 입자의 운동에 영향을 주게 된다. 이 때문에 가속기용 스테인리스강 진공용기는 매우 낮은 투자율을 가지는 것을 사용하여야 한다 [10-12].

본 기술보고서에서는 가속기용 진공용기 재료로 쓰이고 있는 오스테나이트 스테인리스강의 자기적 성질을 파악하고 투자율 관리에 필요한 자료를 실험적으로 수집하여 비자성 재료가 요구되는 진공용분야의 기초정보로 활용하고자 한다. 진공용기의 재료로는 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강 중에서 소재 수급이 비교적 원활한 304와 316L을 사용하였다. 투자율은 소재 입고 후, 열처리 후, 소성가공 후, 기계가공 후, 용접 후, 용접 후 열처리 등 각각의 단계에서 측정하였다.

II. 실 험

투자율 측정용 재료는 포스코에서 생산되는 스테인리스강 304 (시료#1-12), 316L (시료#13-24)과 일본에서 생산되는 316L (시료#25)을 사용하였다. 304는 자기적 특성이

* [전자우편] hms@postech.ac.kr

316L보다 상대적으로 좋지 않지만 가장 흔히 쓰이는 진공 재료이므로 비교분석용으로 선택하였다. 측정에 사용된 스테인리스강의 표준 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 시편은 냉간가공된 것으로 용접, 소성가공, 절삭가공 효과 등 크게 3가지 물리적 공정에 따른 투자율 변화를 측정하였다. 용접 및 소성가공의 시편은 원판(1,000×2,000 mm, 두께 2 mm)을 100×100 mm 크기로 절단하여 사용하였으며, 절삭가공 시편은 일본에서 제조된 재료를 사각판(100×100 mm, 두께 20 mm)으로 제작하였다.

용접시편은 두 장의 스테인리스 강판을 맞대기 용접 (butt weld)으로 제작하였다 (Fig. 1(a)). 소성가공시편은 유압프레스를 이용하여 굽힘 변형을 가하여 만들었으며 평판의 시편을 굽힘 변형을 가한 후 측정할 곡률반경은 32 mm이었다 (Fig.1(b)). 절삭가공시편은 한 쪽 면을 밀링 및 드릴링 기계로 폭 20, 깊이 10 mm를 제거하였으며 절삭면에 직경 10 mm의 구멍을 3개 가공하였다 (Fig.1(c)).

상대투자율은 상온에서 Ferromaster [13]를 사용하여 측정하였으며 Permeability indicator [14]는 비교확인용으로 사용하였다. Permeability Meter (모델명: Ferromaster)로 측정할 투자율(μ)은 $\mu_t = (\mu - 1) / S + 1$ 의 식에 따라 실제 값(μ)으로 변환하였다(두께 2 mm 시료에 대한 감도 S는

-0.56이다). 본 실험에서 사용한 Ferromaster와 Permeability indicator의 분해능은 각각 0.001, 0.01이며 측정가능 최저치는 각각 1.001, 1.01이다.

진공용기 제작 공정의 각 단계별 정확한 투자율 데이터를 얻기 위하여 고온화 열처리를 하여 재료의 초기 투자율도 확보하였다. 각 시편간의 온도 분포가 균일하게 유지되도록 시편을 진공로에 위치한 후에, 압력 $< 7.9 \times 10^{-3}$ Pa에서 1,050°C까지 가열하여 30분간 유지한 후 온도를 내렸다. 열처리가 완료된 시편에 대하여 투자율을 측정하였고 용접, 소성가공 및 절삭가공 후에도 각각 측정하였다.

Table 2는 시편에 적용된 용접조건으로 실제 진공용기의 용접 조건을 포함하고 있다. 선형 자동 용접장치를 이용하여 정확한 용접이 이루어지도록하고 아르곤가스를 사용하여 시편의 용접부 산화를 최소화하였다. 용접 시편에 대한 투자율 측정 위치는 용접 시작과 끝점, 끝점에서부터 7 mm 지점과 용접 비이드의 중앙에서 측정하였다. 또한 용접 비이드 반대쪽의 투자율을 측정하여 용접면과 이면에 대한 투자율 값의 변화도 비교하였다. 용접부에 대한 투자율 측정이 완료된 시편을 초기 소재입고 후 실시한 열처리와 동일한 방법과 조건으로 열처리를 실시하고 용접부 및 이면에 대한 투자율 변화를 측정하였다.

Table 1. Alloy composition of stainless steels 304 and 316L (%).

Material	C (max)	Cr	Ni	Si (max)	P (max)	S (max)	Mn	Mo
304	0.08	18-20	8-10.5	1.0	0.045	0.03	2	-
316L	0.03	16-18	12-15	1.0	0.045	0.03	2	2-3

Table 2. Welding conditions.

Method	Current (A)	Speed (mm/min)	Filler metal	Fusion conditions	Shielding gas
TIG	70-100	300	with or without 308 L, 316L	Partial or full penetration	Ar (99.999%)

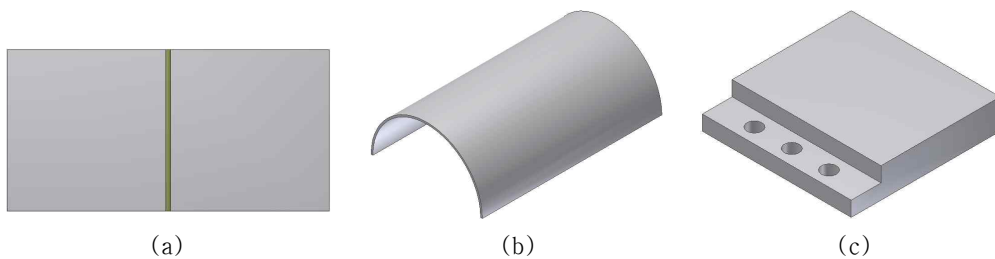


Figure 1. Stainless steels for magnetic permeability measurements: (a) welded (b) cold formed, and (c) machined samples.

Table 3. Relative magnetic permeabilities measured at various stages of fabrication. () ; measured using Ferromaster. []; measured using permeability indicator. Numbers indicate the order of measurements.

Material	As-received	After annealing	After cold forming	After annealing
304 (Sample #1-12)	(1.032-1.073) [1.03-1.05]	(1.004) [<1.01]	(1.04) [1.05-1.1]	(1.005) [1.01-1.02]
316L (Sample #13-24)	(1.019-1.027) [1.01-1.02]	(1.004) [<1.01]	(1.034) [1.05-1.1]	(1.004) [<1.01]

Table 4. Relative magnetic permeabilities measured at various stages of fabrication. () ; measured using Ferromaster. []; measured using permeability indicator. Numbers indicate the order of measurements.

Material	As-received	After annealing	After machining	After annealing
316L (Sample #25)	(1.003) [<1.01]	(1.003) [<1.01]	(1.009) [1.01-1.02]	(1.004) [<1.01]

Table 5. Relative magnetic permeabilities measured at various stages of fabrication. () ; measured using Ferromaster. []; measured using permeability indicator. Numbers indicate the order of measurements.

Material	As-received	After annealing	Welding condition			After weld	After annealing
			Current (A)	Filler	Penetration		
304 (#1-12)	(1.032-1.073) [1.02-1.05]	(1.004) [<1.01]	70	No	Partial	(1.041) [1.1-1.15]	(1.004) [<1.01]
			80	No	Partial	(1.079) [1.1-1.15]	(1.004) [1.01]
			90	No	Partial	(1.125) [1.2-1.4]	(1.004) [1.01]
			90	ER308L	-	(1.155) [1.2-1.4]	(1.009) [1.01]
			90	ER316L	-	(1.168) [1.2-1.4]	(1.007) [1.01]
			100	No	Full	(1.336) [1.6-1.8]	(1.016) [1.02-1.05]
316L (#13-24)	(1.019-1.027) [1.01-1.02]	(1.004) [<1.01]	70	No	Partial	(1.021) [1.05-1.1]	(1.004) [<1.01]
			80	No	Partial	(1.057) [1.1-1.15]	(1.004) [<1.01]
			90	No	Partial	(1.079) [1.1-1.15]	(1.004) [<1.01]
			90	ER308L	-	(1.15) [1.2-1.4]	(1.004) [1.01-1.02]
			90	ER316L	-	(1.132) [1.2-1.4]	(1.007) [1.01-1.02]
			100	No	Full	(1.239) [1.4-1.6]	(1.009) [1.01-1.02]

III. 결과 및 토의

Table 3-Table 5에 각각의 공정조건에서 측정한 실험 결과를 나타내었다. 투자율 수치는 상대투자율(μ , 자유공간 투자율에 대한 상대치)로 표시하였다. () 괄호 안은 Ferromaster로 [] 괄호 안은 Permeability indicator로 측정된 값을 나타내었다. Permeability indicator로 측정된 값은 전반적으로 Ferromaster의 그것보다 크게 나타났지만 측정치의 변화 양상은 일치하였다.

입고상태(as-received)에서 측정한 시편 #1-24의 상대투자율은 $\mu=1.01-1.07$ 로 예상대로 304보다는 316L이 약간 낮게 측정되었다. 이 값은 일반적으로 알려져 있는 오스테나이트강의 투자율에 근접한다(이하 상대투자율을 수치로만 간단히 나타냄). 100% 오스테나이트 구조는 완전한 비자성체이지만 스테인리스강은 소량의 마르텐사이트, 페라이트조직의 존재에 의해 자기적 특성이 변화한다. 투자율은 스틸의 미세구조에 따라서 그 값이 달라지지만 보통의 오스테나이트 스테인리스강의 투자율은 대략 1.05-1.1 정도로 알려져 있다 [15].

304, 316L의 경우 모두 가속기에서 요구하고 있는 수치 $\mu < 1.01$ 를 만족하지 않으며 제조공정에 따라서 투자율이 쉽게 변하여 입고상태로는 적용이 불가능하다(Table 3). 다만 316L (#25)의 경우 투자율은 1.003으로 상대적으로 낮게 측정되었으며 가속기 허용치 내에 있다(Table 4). 이것은 동일 규격의 재료라 할지라도 제작사 별로 합금성분, 제조공정이 다르기 때문에 나타나는 현상일 것이다. 스테인리스강의 낮은 투자율에 관계하는 오스테나이트 조직안정화는 C, N, Ni, Cu, Cr, Mn, Si 등의 합금성분 첨가에 의해 확대된다. 투자율의 상승은 제조공정 중 냉간압연에 의하여 일부 준안정 오스테나이트 조직이 가공유기 마르텐사이트 조직으로의 변태에 기인한다. 결국 자기적 특성을 고려한다면 재료의 제조단계에서부터 합금화 비율을 높이고 최종단계에서 안정화 열처리가 필요함을 말해주고 있다.

입고 후 투자율 측정을 마친 모든 시편은 제작공정에 의한 투자율 변화량을 정확하게 측정하기 위하여 진공 중에서 고온 고용화 열처리를 실시하였다(2절 열처리 조건 참조). 열처리 후의 투자율은 모두 ~ 1.004 로 측정되었다. 이 값은 오스테나이트강에 대하여 현실적으로 얻을 수 있는 최소값 1.003-1.005 내에 있었다 [15].

유압 프레스를 이용한 소성가공에 의한 투자율 변화는

Table 3에 나타내었다. 시료 304 (#1-12), 316L (#13-24) 대부분의 경우 투자율은 ~ 1.04 로 측정되었고 완만하게 굽힘이 있는 부분보다는 뾰족한 모서리 부분에서 투자율이 보다 크게 측정되었다. 절삭가공을 실시한 시편(#25)의 투자율 값은 1.009로 다른 공정과 비교하여 낮은 투자율 상승을 나타내었다(Table 4). 이러한 투자율 변화는 굽힘, 절단, 절삭 가공 등의 공정 중에 일부 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직(strain induced martensite, 강자성)으로 변하기 때문으로 알려져 있다. 이 시편들은 고용화 열처리 후에는 입고상태 소재의 원래 값과 유사한 값을 가졌다.

Table 5에는 용접에 의한 투자율 변화를 나타내었다. 용접전류의 크기, 용접봉의 사용 유무, 용접봉의 재료를 바꾸어 가면서 측정하였다. 용접 후의 투자율 값은 1.04-1.34 (304 시료 #1-12), 1.02-1.24 (316L, 시료 #13-24)로 커졌다. 투자율 상승은 용접조건에 따라 차이를 보이는데 용접봉의 사용 유무 보다는 용접전류의 크기에 좀 더 의존하였다. 전류의 증가, 즉 용접 입열량이 커지고 온도상승이 커지면 상대적으로 투자율이 증가하는 것으로 측정되었다. 이러한 현상은 용접시 오스테나이트 조직의 일부가 고온에서 델타 페라이트로 바뀌게 되고 냉각 후 상온에서도 일정 부분이 남아있기 때문이며, 따라서 용접 부위는 상대적으로 큰 투자율 값을 가지게 된다. 플라즈마 절단, 고온 절단 등의 공정도 용접과 비슷한 투자율 변화를 가져다 주는 것으로 알려져 있다 [15].

한편, 용접면과 용접이면에 대한 투자율 값도 비교해 보았다(측정치는 표시하지 않았음). 그 결과 용접 비이드가 형성된 면이 상대적으로 큰 투자율 값을 보였고 완전 용입 형태의 경우는 용접면과 이면이 유사한 값을 나타내었다.

측정에 사용한 소재 304, 316L 스테인리스강은 용접성을 개선하기 위하여 302로부터 합금구성이 변화되었는데 완전용해 담금질 후에도 소량의 델타 페라이트조직이 존재하므로 기본적으로 일정 값의 투자율을 갖는다. 또한 냉간가공 공정(cold work)에서 발생한 가공 변형이 금속 내부의 격자변화를 일으키며 결국 오스테나이트조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되기 때문에 재료가 가졌던 초기 투자율은 제작공정에 의하여 상승하게 된다. 또 한편으로 용접에 의해 생성된 크롬탄화물은 용접부에 국부적인 페라이트 화를 조장하게 되므로 투자율의 상승을 가져오게 된다. 이같이 소성가공, 용접 등 진공용기 제작 과정 중에 높아진 투자율은 고용화열처리(Full solution annealing)를 통하

여 원래의 소재 상태인 오스테나이트 조직으로 환원가능하다. 또한 고용화 열처리를 통하여 용접에 의해 석출된 크롬 탄화물을 원래대로 고용시켜 조성적 안정화를 통하여 낮은 투자율을 확보 가능케 한다.

고용화 열처리는 1,050–1,120 °C에서 일정시간(대략 30분) 두었다가 상온으로 온도를 내리는 공정을 말한다. 304의 경우 탄소의 함유량이 상대적으로 크므로($\sim 0.08\%$) 냉각중 크롬탄화물의 석출을 막기 위하여 급냉이 필요하다. 316L의 경우 탄소함량이 0.03%로 낮기 때문에 서냉하여도 문제가 없는 것으로 알려져 있다 [15]. 본 실험에서는 1,050°C에서 30분 열처리한 후 질소를 대기압까지 공급하면서 급냉(-660°C/h , max)하였다. 또한 1,000°C 이상의 고온진공로를 사용할 수 없는 경우를 대비하여 860°C, 2시간 열처리 한 후 질소로 급냉하는 공정도 수행하였다. 이 경우 316L의 상대투자율은 $\mu=1.01$ 이하로 나타났다. (Table 5에는 나타내지 않았음)

이처럼 고용화 열처리를 실시하여 제작 공정 동안 상승된 용접시편의 투자율을 304의 경우 완전 용입 조건에서 $\mu=1.016$ 까지 316L은 $\mu=1.009$ 까지 투자율을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 304의 경우 제작 공정후 고용화 열처리를 거치더라도 투자율이 허용치(1.01)를 초과함으로써 가속기용 진공용기로는 적용할 수 없음을 알 수 있다.

가속기에서 입자(전자 등)진행의 통로가 되는 진공용기는 여러 종류의 자석 사이에 설치된다. 진공용기가 자기적 성질을 가지게 된다면 전자석에 의해 인가된 자기장에 에러를 주게 되고 그 결과 전자빔의 운동에 영향을 주게 된다. 가속기 저장링에서 이극/사극전자석, 언듈레이터와 같은 장치의 자장에러의 크기($\Delta B/B$)는 $1-2 \times 10^{-4}$ 이하로 유지되어야 한다. 대부분의 자석은 피크자장이 1.2–1.4 Tesla 정도이므로 자장의 에러가 ~ 2 Gauss 이하가 되어야 함을 알 수 있다. Lee [10]가 측정한 결과에 따르면 1.2 Tesla, 자극간격 5 mm에서 투자율이 $\mu=1.01$ 인 진공용기를 삽입하였을 때 자장의 변화율이 $\Delta B/B < 1.5 \times 10^{-4}$ 로 측정되어 이 경우 진공용기의 사용이 가능할 것이다. 따라서 316L은 용접 후 고용화 열처리를 통하여 최종 투자율을 1.01이하로 유지할 수 있으므로 제3세대 방사광가속기 저장링 진공용기로 적용가능하다고 하겠다.

요약하면, 진공용기의 소재로 오스테나이트 스테인리스강을 사용한다면, 자장 특성에 영향을 주는 세 가지요소, 즉 재료의 화학조성, 제작방법, 물리적조건 등을 철저히 관

리하여야 한다. 가속기용 진공용기 제작의 경우 절단, 굽힘, 용접 공정이 필수적이고 측정 결과에서 보았듯이 용접 뿐 만 아니라 굽힘 과정에서도 이미 허용할 수 없는 투자율 변화가 발생하므로 반드시 투자율을 관리하여야 한다.

IV. 결 론

스테인리스강 304, 316L의 진공용기 제작공정 단계별로 투자율을 측정하였다. 이들 재료들은 일반적으로 비자성체로 알려져 있지만 입고상태에서도 상대투자율이 $\mu=1.03-1.07$ 로 상당히 높게 측정되었으며 진공용기 제작 과정인 굽힘, 절삭 공정에서도 투자율이 상승되었다. 투자율은 용접 후 그 변화량이 가장 크게 측정 되었으며, 용접봉 사용 유무 보다는 용접전류에 크게 의존하였다. 제작 공정 후 고온에서 진공 고용화열처리를 하여 304의 경우 ~ 1.02 , 316L의 경우 ~ 1.01 의 값을 얻을 수 있었다. 따라서 비자성 재료가 요구되는 진공용 분야에서는 반드시 공정후처리를 하여 투자율을 낮추어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] D. Jiang, Y. Chen, L. Chen, W. Li, Y. Lu, and Y. Liu, Proceedings of the 2007 Asian Particle Accelerator Conference APAC07, p. 708 (www.jacow.org).
- [2] A. Blednykh and S. Krinsky, Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference PAC07, p. 4333 (www.jacow.org).
- [3] R. Kersevan and L. Goirand, Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference PAC07, p. 164 (www.jacow.org).
- [4] G. Hsiung, C. Chan, C. Chang, H. Hsueh, and T. Yang, Proceedings of the 2006 European Particle Accelerator Conference EPAC06, p. 3433 (www.jacow.org).
- [5] C. D. Park, Proceedings of the 35th KVS meeting (2008).
- [6] C. D. Park, T.-Y. Lee, I. H Bae, and S. M. Chung,

- J. Vac. Sci. Technol. A. **18**, 2272 (2000).
- [7] C. D. Park, J. Kor. Vac. Soc. **17**, 1 (2008).
- [8] C. D. Park, T. Ha, S. Moon, I. Bae, and S. Chung, J. Kor. Vac. Soc. **10**, 164 (2001).
- [9] C. D. Park, S. M. Chung, D. J. Seong, Y. H. Shin, and K. H. Chung, J. Korean Phys. Soc. **51**, 912 (2007).
- [10] S. H Lee, I. Vasserman, S. Sasaki, and D. Walters, Proceedings of the 2005 Free electron Laser Conference FEL05, p. 383 (www.jacow.org).
- [11] N. Wilson and P. Bunch, Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference PAC91, p. 2322 (www.jacow.org).
- [12] C. Weber and J. Fajans, Rev. Sci. Inst. **69**, 3695 (1998).
- [13] www.stefan-mayer.com.
- [14] Permeability indicator No. 3988 5150, manufactured by Severn Engineering Company, Annapolis, MD.
- [15] See, e.g. Technical notes, British Stainless Steel Association, www.bssa.org.uk.

Magnetic Permeability Measurement of Stainless Steels in Vacuum Chamber Fabrication

M. S. Hong* and C. D. Park

PAL, POSTECH, Pohang 790-784

(Received August 24, 2010, Revised October 21, 2010, Accepted October 28, 2010)

We measured the magnetic properties of stainless steels type 304 and 316L to see if those materials can be used for the applications where non-magnetic materials are required. The results show that the relative permeability of samples was greatly increased during manufacturing processes. After full solution annealing, however the permeability could be reduced to less than 1.02. Thus, the materials may be employed in the low-permeability applications.

Keywords : Vacuum chamber, Stainless steel, Welding, Thermal treatment, Magnetic permeability

* [E-mail] hms@postech.ac.kr