

Tensile Stress Measurement of Tendon by Means of Non-contact Yoke Method

Sunju Kang and Derac Son*

Dept. of Photonics and Sensors, 70 Hannamro, Daejeon 34430, Korea

Changbin Joh and Jungwoo Lee

Korea Institute of Civil Engin. and Building Tech., 283 Goyangdaero, Goyang 10223, Korea

(Received 17 November 2015, Received in final form 7 February 2016, Accepted 11 February 2016)

In this study, we have constructed a measuring system to investigate tensile stress measurement of tendons, which is employed in bridges, by means of the non-destructive and non-contact method. The measuring system consists of tensile stress applying apparatus up to 2 GPa, and power supply for ac and dc current to tendon directly to magnetize tendon in circular direction and to coil wound on yoke to magnetize tendon in axial direction. We have used two kinds of tendon, which were produced by different companies, using the measuring system constructed in this work. Two kinds of experiments are carried out in this work; 1st experiment : ac current was applied to the tendon and dc current was applied to coil wound on the yoke, and voltage induced from search coil wound on yoke (SCY) was measured and 2nd experiment : dc current was applied to the tendon and ac current was applied to coil wound on the yoke, and voltage induced from search coil on tendon (SCT) was measured. In case of 1st experiment, voltage induced from SCY was changed below 200 MPa tensile stress but the voltage was not increased above 200 MPa. In case of 2nd experiment, voltage induced from SCT was decreased up to 1.5 GPa linearly. We expect that 2nd experiment could be applied to the non-destructive testing of tensile stress measurement of tendon.

Keywords : tendon, NDT, magnetostriction, Villari effect

Yoke를 사용한 비접촉 방법에 의한 텐던 인장응력 측정

강선주 · 손대락*

한남대학교 광 · 센서공학과, 대전시 대덕구 한남로 70, 34430

조창빈 · 이정우

한국건설기술연구원, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

(2015년 11월 17일 받음, 2016년 2월 7일 최종수정본 받음, 2016년 2월 11일 게재확정)

본 연구는 현재 교량에 사용되고 있는 텐던의 하중 특성을 비파괴적이면서 비접촉방법으로 측정하기 위한 것으로, 텐던의 인장력에 따른 자화상태의 변화를 보기 위하여 2 GPa까지 인장력을 인가할 수 있는 장치와 텐던에 dc 전류와 ac 전류를 인가하여 텐던을 원주 방향으로 자화시키기 위한 전류공급장치, 요크(yoke)를 사용하여 비접촉으로 텐던의 축 방향으로 자화시키기 위한 요크 장치를 제작하였다. 시편은 비교실험을 위하여 두 제조회사에서 제작된 텐던을 사용하였으며 제작된 측정 장치로 두 가지 조건의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 텐던에 ac 전류를 인가하면서, 요크에 dc 전류를 인가하여 인장력에 따른 유도기전력을 요크에 부착된 탐지코일(SCY)로 측정하였고, 이를 통해 200 MPa 이하의 인장력에서는 민감하게 변화하는 것을 볼 수 있었지만 실질적으로 텐던의 인장력을 측정하여야 하는 1.5 GPa 근처에서는 그 변화량이 매우 적었다. 두 번째 실험은 요크에 ac 전류를 인가한 후, 텐던에 dc 전류를 인가하여 인장력에 따른 유도기전력을 텐던에 부착된 탐지코일(SCT)로 측정하였고, 측정 결과 유도기전력이 선형적으로 감소하였으며 이를 활용하여 텐던의 인장력을 비파괴적이면서 비접촉 방법으로 측정 가능할 것으로 생각된다.

주제어 : 텐던, 비파괴, 자기변형, Villari 효과

I. 서 론

철은 지구에서 가장 풍부한 원소 중 하나로써, 가공이 쉽기 때문에 차량, 선박, 교량 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한 철은 구조용 강으로도 많이 사용되는데, 그 예로는 교량에 사용되는 텐던이 있다. 텐던은 토목 및 건설 등 활용 범위가 매우 넓은 철강소재이나, 구조용 강으로 사용될 경우 안전 진단이 쉽지 않다. 안전 진단을 위해서는 비파괴 검사(Non-Destructive Testing)가 필수적이지만 철강의 자기적 특성인 자화곡선의 비선형과 자기이력곡선의 이력(hysteresis) 현상으로 인하여 비파괴 검사를 시행하기 어렵다. 때문에 파괴 측정 대상체를 포화 자화 시킨 후 와전류 탐상을 하는 방법 [1], 누설 자속을 탐지하는 방법 [2] 등 자기적 특성을 활용한 비파괴 탐상이 다양하게 진행되어 왔다.

또한, 강철의 자기변형(magnetostriction)현상을 이용하는 것으로, 영구자석을 사용 철관을 자화시키고 펄스 자기장을 인가하여 철관에 펄스형태의 음파를 발생시키면 수신부 코일에서는 이 음파로 인해 자기변형의 역현상에 의한 자기유도의 변화가 발생하여 전압이 유도된다. 이 유도되는 전압의 시간 차로부터 송신부와 수신부 사이에 존재할 수 있는 기계적 결함을 검사하는 방법이 있다 [3, 4]. 광학적 특성을 활용한 비파괴 탐상 방법으로는 광섬유가 받는 인장력에 따른 굴절률의 변화를 간섭계를 통해 측정하여 그 정도를 판별하는 방법도 있다 [5].

본 연구에서는 현재 교량에 사용되고 있는 텐던의 하중 특성을 비파괴적이면서 비접촉으로 측정하기 위한 방법을 연구하였다. 최근 널리 사용되고 있는 초기투자율(μ_i)과 증분투자율(μ_Δ)을 활용한 측정방법은 텐던의 자기소거상태에서 측정하여야 하는 어려움이 있다. 때문에 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 텐던에 dc 전류와 ac 전류를 인가하여 그에 따른 텐던의 자화 상태 변화를 비접촉 방법으로 측정하였다. 실험은 텐던에 ac 전류 또는 dc 전류를 인가하여 텐던을 원주 방향으로 자화시키는 방법과 요크(yoke)를 사용하여 비접촉으로 텐던을 축 방향으로 자화시키는 방법을 사용하였고, 이들의 조합에 의한 텐던의 자화상태 변화를 측정하기 위한 측정 장치를 제작하였다.

비교실험을 위하여 시편은 두 제조회사의 텐던으로, 직경이 15.5 mm이고 7개의 strand로 구성된 동일한 규격의 텐던을 사용하였다. 또한, 인장력에 따른 텐던의 자기적 특성 변화를 보기 위하여 텐던에 인장력을 인가할 수 있는 측정 장치를 제작하였다 [6, 7]. 제작된 측정 장치를 통해 교량에 사용되고 있는 텐던의 인장력에 따른 자화상태 변화를 텐던에 부착된 탐지코일(SCT)과 요크에 부착된 탐지코일(SCY)을 이용하여 비파괴적이면서 비접촉 방법으로 측정하고 분석하였다.

II. 측정 장치의 제작

본 연구에서는 텐던에 인장력을 2 GPa까지 인가할 수 있는 측정 장치와 텐던에 ac 또는 dc 전류를 직접 인가하여 텐던을 원주 방향으로 자화시키기 위한 전류공급장치, 텐던을 외부에서 비접촉으로 축 방향 자화시키기 위한 요크를 제작하였다.

텐던에 인장력을 인가한 상태에서 자기적 특성을 측정하기 위하여 30,000 kg까지 인장력을 인가할 수 있는 수동유압장치를 사용하였고, 힘의 측정은 범위가 50,000 kgf인 load cell을 사용하여 구성하였다. 또한, 텐던에 ac 전류를 인가하기 위한 전류공급장치는 전류변압기(CT)를 사용하여 60 Hz의 교류 전류를 0 A_{rms}에서 300 A_{rms}까지 인가할 수 있도록 제작하였다. 텐던에 흘려주는 전류를 조절하기 위해 변압기의 입력 전압을 조절하는 방식을 택하였으며 1 kW의 슬라이다스를 사용하였다. dc 전류를 인가하기 위한 전류공급장치는 0 A_{rms}에서 30 A_{rms}까지 인가할 수 있도록 하였다.



Fig. 1. (Color online) Photograph of the measuring yoke system constructed in this work; ① dc power supply, ② ac power supply, ③ load cell, ④ oil piston, ⑤ yoke apparatus.

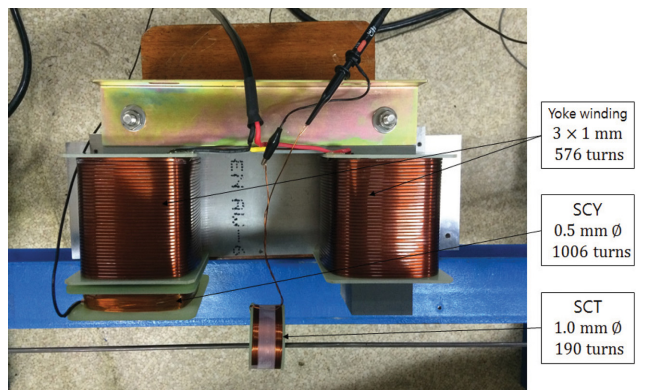


Fig. 2. (Color online) Photograph of the yoke apparatus constructed in this work.

Yoke winding
3 × 1 mm
576 turns

SCY
0.5 mm Ø
1006 turns

SCT
1.0 mm Ø
190 turns

텐던을 비접촉으로 축 방향 자화시키고, 텐던의 자기유도 변화를 측정하기 위한 요크는 0.5 mm 두께의 U자형 무방향성 전기강판을 적층하였으며, 여자코일은 각각의 요크에 크기가 3 mm × 1 mm인 각형 에나멜 동선을 576회 권선하여 제작하였다. 텐던의 자기유도 변화를 요크에서 측정하기 위한 요크에 부착된 탐지코일은 직경이 0.5 mm인 에나멜 동선을 1006회 권선하여 사용하였으며, 텐던에서 직접 측정하기 위한 텐던에 부착된 탐지코일은 직경이 1.0 mm인 에나멜 동선을 190회 권선하여 사용하였다. Fig. 1은 제작된 측정 장치의 전체 사진이며, Fig. 2는 제작된 요크의 사진이다.

III. 측정 및 해석

제작된 측정 장치를 사용하여 두 제조회사의 텐던에 대한 두 가지 조건의 실험을 수행하였으며 이를 통해 텐던의 인장력에 따른 자기적 특성을 분석하였다. Fig. 3(a)에서는 텐던에 ac 전류를 인가하고 요크의 여자코일에는 dc 전류를 인가하여 요크에 부착된 탐지코일에서 유도된 ac 전압을 측정하는 장치의 개략도이다. Fig. 3(b)에서는 요크의 여자코일에 ac 전

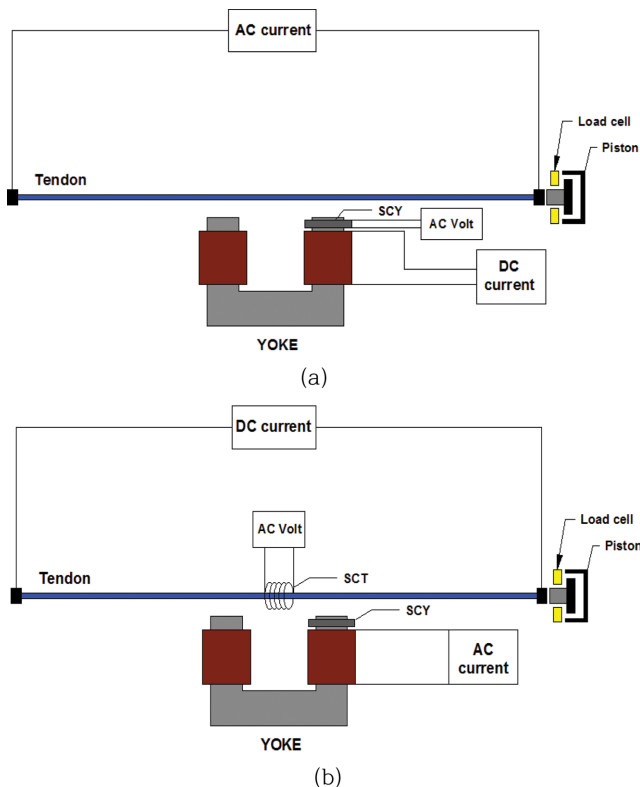


Fig. 3. (Color online) Schematic diagram of the measuring methods in this work; (a) dc current was applied in yoke and ac current was applied in tendon, and voltage induced in SCY was measured, (b) ac current was applied in yoke and dc current was applied in tendon, and voltage induced in SCT was measured.

류를 인가하고 텐던에는 dc 전류를 인가하여 텐던에 부착된 탐지코일에서 유도된 ac 전압을 측정하는 개략도이다. 모든 측정에서 텐던과 요크 사이의 간격은 50 mm로 동일하게 하였다.

Fig. 4는 Fig. 3(a)의 방법으로 A회사와 B회사의 7-strands 텐던을 측정한 그래프이다. Fig. 4에서는 텐던에 ac 전류를 140 A_{rms} 인가하고 요크에 dc 전류를 각각 0 A_{rms}, 1 A_{rms}, 5 A_{rms} 인가시켜 측정한 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보면 텐던의 인장력을 측정하여야 하는 1.5 GPa 영역에서는 유도되는 기전력의 변화가 매우 적었지만, 반면에 200 MPa 이하에서는 유도되는 전압의 변화를 관측할 수 있었다. 따라서 이 방법의 경우 텐던과 요크 사이의 간격을 일정하게 유지할 수 있으면 텐던에 인가되는 인장력을 판단하는 정도의 방법으로는 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

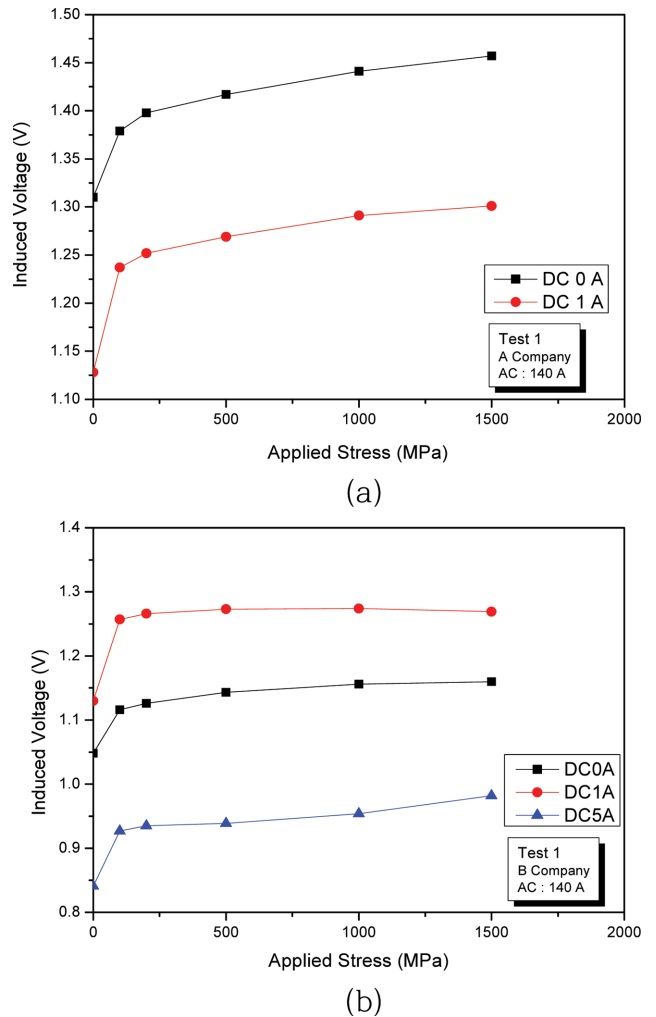
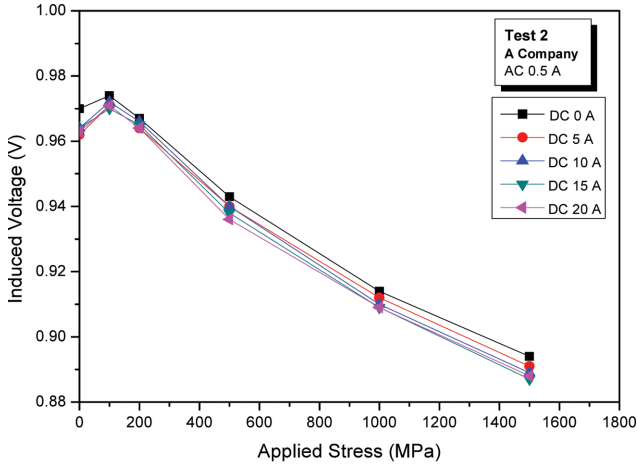
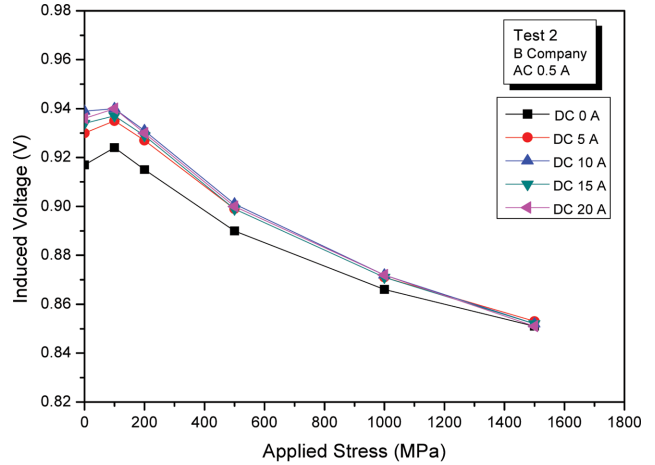


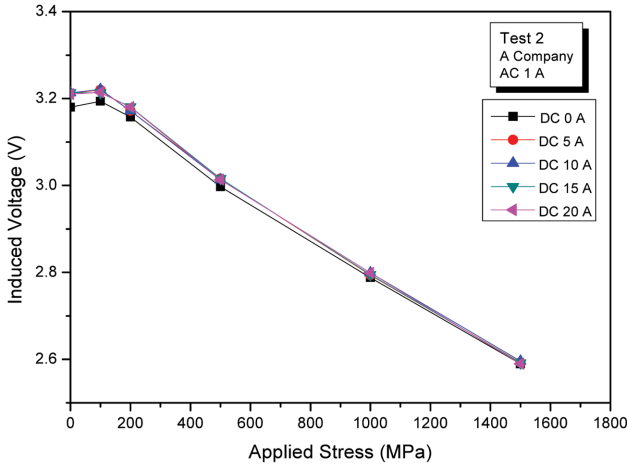
Fig. 4. (Color online) Voltage induced from SCY when 140 A_{rms} ac current was applied to the tendon and dc current was applied in the yoke coils under different tensile stress up to 1.5 GPa; (a) for A-company tendon and (b) for B-company tendon.



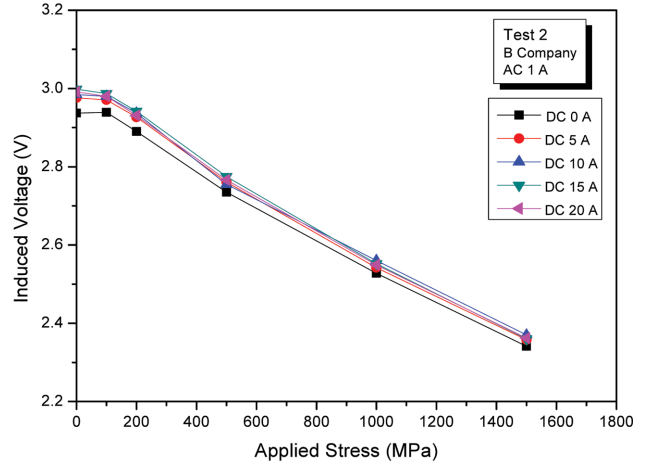
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5. (Color online) Voltage induced from SCT when ac current was applied to the yoke coils and dc current was applied in tendon under different tensile stress up to 1.5 GPa for the A-company tendon (a) for 0.5 A_{rms} and (b) for 1 A_{rms} ac current was applied in yoke coils.

Fig. 6. (Color online) Voltage induced from SCT when ac current was applied to the yoke coils and dc current was applied in tendon under different tensile stress up to 1.5 GPa for the B-company tendon (a) for 0.5 A_{rms} and (b) for 1 A_{rms} ac current was applied in yoke coils.

Fig. 5는 Fig. 3(b)의 방법으로 A회사의 7-strands 텐던을 측정된 그래프이며, Fig. 6는 B회사의 7-strands 텐던을 측정된 그래프이다. Fig. 5와 Fig. 6에서는 요크에 인가된 ac 전류가 각각 0.5 A_{rms} , 1 A_{rms} 일 때, 텐던에 인가하는 dc 전류를 0 A_{rms} , 5 A_{rms} , 10 A_{rms} , 15 A_{rms} , 20 A_{rms} 로 증가 시키면서 측정된 데이터를 그래프로 나타내었다. 요크에 1 A_{rms} 를 인가한 경우 텐던에 dc 전류를 인가하는 정도에 무관하게 인장력에 따라 텐던에 부착된 탐지코일의 기전력이 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 이 방법은 텐던의 인장력을 비파괴적이면서 비접촉으로 측정 가능한 방법이나, 텐던에 권선되는 탐지코일은 텐던을 부착하는 작업과 동시에 하여야 되기 때문에 신설되는 교량에 사용가능하며, 요크와 텐던 사이의 거리를 어느 정도 일정하게 유지한다면 비접촉으로 인장력을 측정하는 방법으로 사용 가능할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 텐던의 인장력을 비파괴적이면서 비접촉 방법으로 측정하기 위하여 텐던에 인장력을 2 GPa까지 인가할 수 있는 측정 장치와 텐던에 ac 또는 dc 전류를 인가하여 텐던을 원형 자화시키기 위한 전류공급장치, 텐던을 외부에서 비접촉으로 측정 방향을 자화시키기 위한 요크 장치를 제작하였다. 인장력을 인가하기 위한 장치는 수동 유압기를 사용하여 30,000 kg까지 인가할 수 있도록 하였고, 힘은 50,000 kg까지 측정할 수 있는 load cell을 사용하여 측정하였다. 또한, 전류를 인가하여 그에 따른 자기적 특성 측정을 위해 dc 전류는 0 A_{rms} 에서 30 A_{rms} , ac 전류는 전류변압기(CT)를 사용하여 60 Hz의 교류 전류를 0 A_{rms} 에서 300 A_{rms} 까지 인가할 수 있도록 구성하였다.

본 연구에서는 인장력 측정 방법을 조사하기 위하여 두 가지 조건의 실험을 수행하였다. 첫 번째 조건은 텐던에 ac 전류를 인가하면서, 요크에는 dc 전류를 인가하여 1.5 GPa까지 인장력을 변화시키면서 요크에 부착된 탐지코일로부터 유도된 전압을 측정하였고, 두 번째 조건은 요크에 ac 전류를 인가하면서, 텐던에 dc 전류를 인가하여 1.5 GPa까지 인장력을 변화시키면서 텐던에 부착된 탐지코일로부터 유도된 전압을 측정하였다. 첫 번째 측정조건의 경우, 200 MPa 이하의 인장력에서는 민감하게 변화하는 것을 볼 수 있었지만 텐던의 인장력을 측정하는 1.5 GPa 근처에서는 그 변화량이 매우 적었다. 따라서 텐던에 인가되는 인장력을 판단하는 정도의 방법으로 사용 가능할 것으로 예상된다. 두 번째 측정 조건의 경우는 텐던의 인장력에 따라 텐던에 부착된 탐지코일에서 유도되는 기전력이 선형적으로 감소하였으며, 이를 통해 탐지코일을 권선하여 제작한 텐던을 신설되는 교량에 사용한다면 텐던의 인장력을 비접촉으로 측정할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구개발을 위하여 2015년 한남대학교 학술연구조성비

에 의하여 일부 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] D. Son, W. I. Joung, D.-G. Park, and K. S. Ryu, *J. Magn.* **14**, 97 (2009).
- [2] K. S. Ryu, Y. T. Park, D. L. Atherton, and L. Clapham, *J. Korean Society for Nondestructive Testing* **23**, 263 (2003).
- [3] A. Jarosevic, *Nato ASI Series 3 High Technology* **65**, 107 (1998).
- [4] B. Fernandes, J. D. Wade, D. K. Nims, and V. K. Devabhaktuni, *Research in Nondestructive Evaluation* **23**, 46 (2012).
- [5] H. J. Shin, S.-J. Song, and Y. H. Jang, *J. Korean Society for Nondestructive Testing* **20**, 538 (2000).
- [6] S. Kang, C. Joh, J. Lee, and D. Son, *J. Korean Magn. Soc.* **24**, 123 (2015).
- [7] S. Kang, C. Joh, J. Lee, and D. Son, *Digests of the KMS 2015 Summer Conference* **25**, 166 (2015).