

논문 2010-5-1

전파를 이용한 도체 Scale 분석에 Regression Progress 기법 이용 연구

Regression Progress to Evaluate Metal Scale Thickness using Microwave

문성진*, 박위상**

Sung Jin Muhn*, Wee Sang Park**

요약 본 논문은 열연 공정을 거친 철강 강판에 형성된 산화철 층, 즉 scale 층의 두께를 유전체 렌즈 안테나를 이용하여 측정하는 방법을 소개하였다. 유전체 렌즈 안테나는 X 밴드 대역에서 주파수에 독립적인 특성을 가지며, 혼 안테나에서 방사되는 구면파를 초점이 형성되는 평면에 평면파를 형성하는 역할을 한다. 이러한 동작원리를 이용하여 철강 강판에 형성된 scale 층에 완전 도체와 유전체로 형성된 two-layer 구조에 직각 입사하는 평면파의 이론적 해석이 적용될 수 있다. Scale의 두께를 도출해 내는 과정에서 유전체 렌즈의 영향을 최소화하기 위한 calibration 과정이 삽입되었으며, 이로 인한 반사 계수 위상의 오차가 발생하였다. 이러한 위상 오차에 의한 scale 두께의 오차를 줄이기 위하여, 수치적으로 regression 방법을 사용하였으며, 기존의 iteration 방법과 비교하여, 주기적으로 얻어지는 두께의 값이 아닌 단일 두께 값을 얻어낼 수 있었다.

Abstract This paper deals with a method to measure the thickness of scale-layer, iron oxide formed on the surface of the rolling steel, using a dielectric lens antenna. The dielectric lens antenna has an independent characteristic with the frequency in the X-band and changes the spherical wave radiated from a horn antenna into a plane wave at the focusing point. Using this concept, we regard a scale-layer on the rolling steel as a dielectric-PEC(Perfect Electric Conductor) layer and apply a theoretical analysis of the normal-incident plane wave. To reduce the phase error arising from the use of the dielectric lens antenna, this paper utilizes a regression process algorithm. In comparison with the conventional iteration algorithm, the present algorithm led to a unique solution for the thickness of the scale-layer.

Key Words : Scale thickness, Dielectric lens antenna, Regression progress

1. 서 론

철강 생산 공정은 크게 제선과 제강 과정으로 크게 나눌 수 있다. 제선 공정은 자연 상태의 불순물이 많은 철광석을 열원인 코크스를 이용하여, 불순물을 제거하여

깨끗한 순도의 선철을 얻어내는 과정을 말한다. 또한 제강 공정은 제선 공정에서 얻어진 선철을 필요로 하는 강도 및 연성 등을 고려하여, 추가적인 성분을 추가하고, 원하는 모양으로 만들어내는 일련의 모든 공정을 일컫는다. 이러한 철강 공정들은 공정 자체의 특성 상 매우 고온의 환경에서 이루어지게 되며 고온의 환경은 공기 중의 산소와 고온의 철강이 산화작용을 급속도로 일으킬 수 있는 최적의 조건으로 작용하게 된다.

고온의 철강 표면에 형성된 산화 피막을 일반적으로

*준회원, 포항공과대학교 전자전기공학과

**정회원, 포항공과대학교 전자전기공학과(교신저자)

접수일자 2010.7.20 수정일자 2010.9.15

게재확정일자 2010.10.15

‘scale’이라 하며, scale이 철강 표면에 고르게 형성이 되면 산화피막의 역할을 하여 철강 표면에 불필요한 녹의 발생을 막을 수 있으며, 철강의 강도를 어느 정도 보완해 줄 수 있는 역할을 하게 된다. 하지만, 이러한 scale의 형성은 이상적으로 철강 표면에 고르게 형성이 되지 않으며, 매우 불규칙하게 형성이 된다. 철강 표면에 불규칙하게 형성된 scale층은 밀도의 불균형에 따라 철강 표면에 균열을 발생시킬 수 있으며, 추가 공정에 적지 않은 문젯거리가 된다. 현재 철강 제조 공정에서는 이렇게 형성된 scale을 임의로 산(acid) 처리를 하여, 제거하는 추가적인 공정을 진행하고 있다. 만약 철강 표면에 형성된 scale의 전체적인 두께를 평균적으로 분석해 낼 수 있다면, 추가적인 산 처리 공정에 의미 있는 data-base를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 X band 대역의 millimeter wave를 이용하여, 10 mm ~ 100 mm 의 두께를 가지는 scale 층의 두께를 분석하는 방법에 대해서 소개하였으며, 이론적 결과 값과의 비교를 통하여 오차 발생 원인을 분석하였다.

II. 철강 scale의 물성 분석

철강 scale의 두께를 측정하기 위해서는 scale이 형성된 형태와 전체적인 구조에 대한 modeling이 우선이 되어야 한다. 철강 scale은 전도율이 매우 큰 Fe위에 산소와의 산화과정으로 형성된 화합물로서, FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄를 주성분으로 이루어져 있다. 이 중 Fe₂O₃의 비율이 90% 이상이 되므로, scale 층을 단일 Fe₂O₃층으로 간주할 수 있다. 상온에서의 Fe₂O₃는 광물 형태의 그것과 화합물 구성비가 동일하여, 본 논문에서는 이를 이용하여, scale의 물성을 측정하였다.



그림 1. Fe₂O₃물성 측정을 위한 시료제작 및 측정
Fig 1. Measurement and fabrication of samples to analyze characteristics of Fe₂O₃

그림 1 은 분말 형태의 Fe₂O₃의 물성을 측정하기 위하여, resin을 이용하여 시료를 제작하는 공정과 제작된 시료를 동축 케이블의 S-parameter 추출을 이용한 물성 측정의 과정을 나타내고 있다.

Resin은 무 결정형 합성수지로서 분말 형태의 Fe₂O₃를 고정시키는 역할만 하게 되며, 시료의 물성에는 거의 영향을 미치지 않음을 측정 결과로 판단할 수 있다. 측정된 Fe₂O₃의 유전율과 투자율이 그림 2 에 나타나 있다.

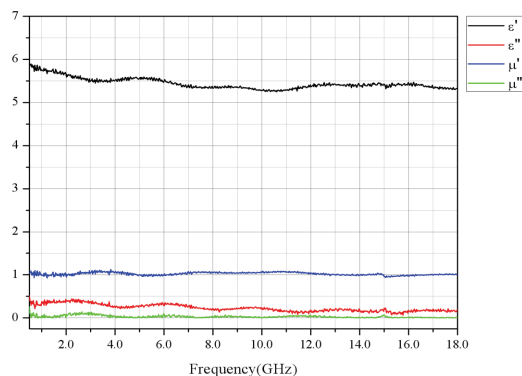


그림 2. 주파수에 따른 Fe₂O₃의 유전율 및 투자율
Fig 2. Permittivity and permeability of Fe₂O₃ along the frequency

그림 2 에서 알 수 있듯이 X band 주파수에서는 Fe₂O₃의 유전율은 약 5.2의 비유전율 값을 가지고, tangent loss는 거의 0 에 가까움을 알 수 있다. 또한 투자율은 공기와 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 실험 결과는 scale층이 화합물로 형성되어, 각각을 구성하는 Fe와 O의 성질을 잃고 단순히 유전체로 동작하는 것으로 판단할 수 있는 근거가 될 수 있다

III. Dielectric Lens Antenna를 이용한 scale두께 분석

본 절에서는 앞 절에서 언급된 Fe₂O₃의 물성을 기반으로 scale 층을 비유전율 5.0 의 유전체로 등가화하고, 유전체 뒷면에 metal이 위치해 있는 형태로 modeling 하였다. 또한 horn antenna와 dielectric lens antenna를 이용하여 임의의 두께를 가진 유전체의 두께를 추출해 내는 과정을 소개한다.

1. Dielectric Lens antenna 설계

본 논문에서 사용된 dielectric lens antenna는 주파수에 독립적인 특성을 가지게 되는 형태로 선택하였으며, wide-band에서 안테나로부터 방사되어 나오는 구면파를 평면파 혹은 focused wave로 바꾸어주는 역할을 하게 된다. 칠강 표면은 고온에서 형성된 scale의 불균일한 분포로 인하여 rough한 특성을 가지게 되며, 각 부분마다 다른 두께를 가지게 되므로, 특정 point에 대한 두께 측정만이 의미가 있게 된다. 따라서 focused wave를 형성할 수 있는 bi-convex 형태의 lens antenna를 설계하였으며, 기본적인 동작원리는 그림 3에 잘 나타나 있다.

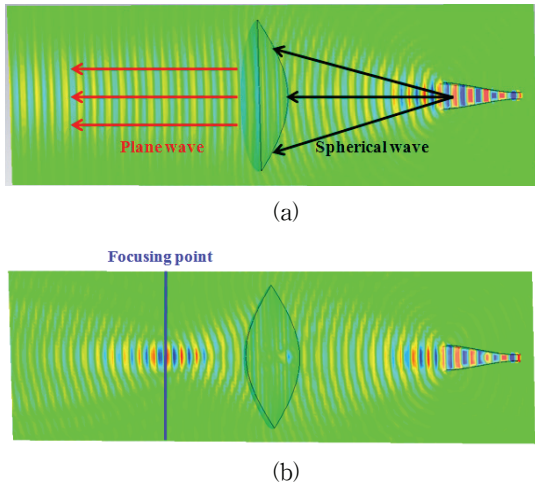


그림 3. Lens 형태에 따른 wave 특성 변환
 (a) Uni-convex lens antenna
 (b) Bi-convex lens antenna
 Fig 3. Changes of wave characteristics along kinds of lems (a) Uni-convex lens antenna (b) Bi-convex lens antenna

2. Calibration Process

그림 3 (b)의 bi-convex lens를 이용하여 focusing point를 설정하게 되면, focusing point를 중심으로 한 부근에서는 근사적으로 평면파가 된다. 이론적인 값과의 비교를 통해 임의의 dielectric 두께를 비교하려면, dielectric lens에 의한 영향을 배제하여야 하므로, 측정값에 대한 추가적인 calibration을 하여야 한다.

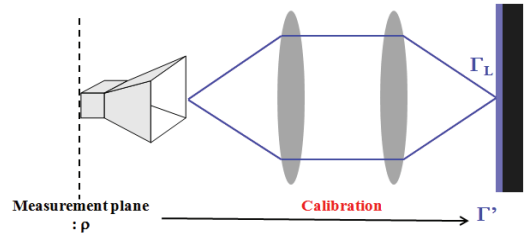


그림 4. Calibration의 필요 개념도
 Fig 4. Key map of calibration

그림 4에서 보는 바와 같이 평면파에 의한 Γ_L 은 impedance transformation에 의해서 아래와 같이 간단한 식으로 표현될 수 있다^{[1][2]}.

$$\Gamma_L = \frac{\frac{j}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan(kd \sqrt{\epsilon_r}) - 1}{\frac{j}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan(kd \sqrt{\epsilon_r}) + 1} \quad (1)$$

식(1)과 같은 normal 입사되는 평면파에 의한 경계면에서의 이론적인 반사계수식은 아래와 같이 임의의 dielectric sample의 두께로 표현될 수 있다.

$$d = \frac{1}{k_0 \sqrt{\epsilon_r}} (\tan^{-1}[-j \sqrt{\epsilon_r} (\frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L})] + n\pi) \quad (2)$$

식 (2)에서의 Γ_L 값을 측정된 반사 계수로 대체를 하게 되면, 원하는 dielectric sample의 두께를 얻을 수 있다. 이를 위해서는 그림 4에서 보는 바와 같이 측정된 S-parameter값에서부터 경계면에서의 반사 계수 값으로 변환을 할 필요가 있다. 이에 대한 과정을 calibration process라 한다.

Calibration process는 그림 4의 실험 구조를 간단한 signal flow graph로 표현하여 나타낼 수 있다.

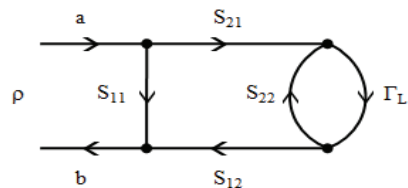


그림 5. Calibration을 위한 signal flow graph
 Fig 5. Signal flow graph for calibration procedure

그림 5 에서 ρ 는 측정되는 S-parameter 값을 나타내며, Γ_L 은 sample 경계면에서의 반사 계수를 의미한다. 그림 5 에서의 signal flow graph를 Mason's rule을 이용하여 ρ 값을 구해내면 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\rho = S_{11} + \frac{S_{21} \cdot \Gamma_L \cdot S_{12}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \quad (3)$$

식 (3) 에 포함되어 있는 반사 계수를 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다^[37].

$$\Gamma_L = \frac{\rho - A}{(C \cdot \rho - A \cdot C + B)} \quad (4)$$

here,

$$S_{11} = \rho_{match} = A$$

$$S_{12} \cdot S_{21} = \frac{(\rho_{short} - \rho_{match}) - (\rho_{match} - \rho_d) \cdot e^{j2k\delta}}{\rho_d - \rho_{short}} = C$$

$$S_{22} = \frac{(\rho_{short} - \rho_{match}) \cdot (\rho_{match} - \rho_d) \cdot (1 - e^{j2k\delta})}{\rho_d - \rho_{short}} = B$$

따라서 horn antenna에서 측정된 S-parameter 값들로부터 sample 경계면에서의 등가 반사 계수를 위의 식으로부터 구할 수 있으며, 식 (2) 를 이용하여 원하는 두께를 측정해 낼 수 있다.

3. Simulation 결과와 이론과의 비교

그림 4 와 같은 model로 CST simulation을 수행하였으며, calibration process는 앞 절에서의 과정을 통하여 이루어졌다.

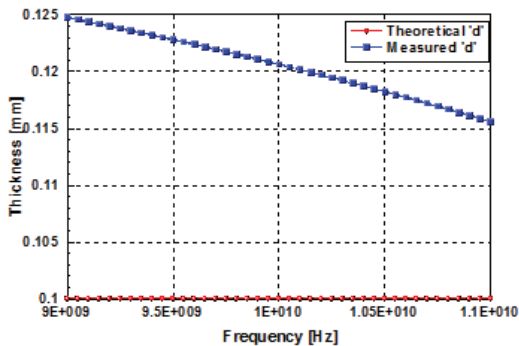


그림 6. Sample 두께 0.1 mm일 때의 결과
Fig 6. Simulated result as the thickness of sample 0.1 mm

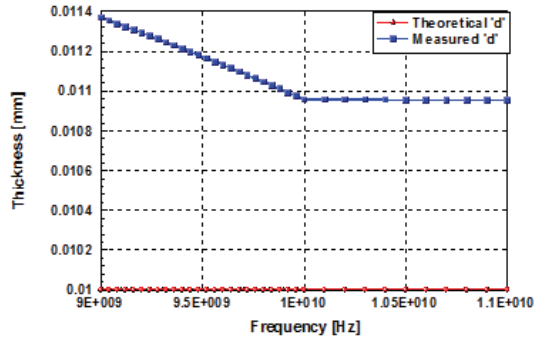


그림 7. Sample 두께 0.01 mm일 때의 결과
Fig 7. Simulated result as the thickness of sample 0.01 mm

그림 6 과 그림 7 에서 나타난 바와 같이 이론값과의 비교에서 5 ~ 10 %의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 위의 결과들은 선형 regression 방법을 이용하여, focusing point에서의 평면파 근사에 따른 반사 계수의 위상 오차를 최소화하는 방법으로 수행되었다. 만약 regression 과정 없이 sample의 두께를 측정하게 되면 더욱 더 큰 오차를 수반하게 되며, 식 (2)의 tangent 성분에 의해서 두께가 complex 값을 가지며, $n\pi$ 에 따라 주기적인 값으로 표현되어, unique한 값을 얻어내기 어렵다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 dielectric lens를 이용하여 근사 평면파를 얻어내어 임의의 sample 두께를 얻어낼 수 있는 방법에 대해서 소개하였다. 근사적으로 평면파로 가정되었기 때문에 발생할 수 있는 반사 계수의 위상 오차를 선형 regression 방법으로 최소한으로 하였으며, 이를 도표와 함께 나타내었다.

현재 dielectric lens가 제작 중이며, 제작 완료 후 정밀한 focusing point에 대한 실험을 통하여 최소 오차로 원하는 sample의 두께를 측정해 낼 수 있는 연구가 진행될 것이다.

참고 문헌

[1] David Pozar, Microwave Engineering, Third Edition, John Wiley & Sons, 2005.

- [2] Umran S. INAN, Aziz S. INAN, *Electromagnetic Waves*, Prentice Hall, 1999.
- [3] David R. Gagnon, "Highly Sensitive Measurements with a Lens Focused Reflectometer," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, No. 12, pp. 2237 - 2240, December 1991.
- [4] H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1961
- [5] J. K. Hunton, "Analysis of microwave measurement techniques by means of signal flow graphs," *IRE Trans. MTT*, vol. 8, pp. 206-212, 1960.
- [6] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 1322-1329, 1966.

저자 소개

문 성 진(준회원)



- 2006년 경북대학교 전자전기공학과(공학사)
- 2009년 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
- 2009년 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

<주관심분야 : 무선전력전송 시스템, 루프 안테나, 철강 공정 및 철강 스케일 분석 연구, RF wave modulation Tech>

박 위 상(정회원)



- 1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
- 1982년 6월: University of Wisconsin - Madison 전자공학과 (공학석사)
- 1986년 8월: University of Wisconsin - Madison 전자공학과

(공학박사)

- 1984년1월 ~ 1986년 8월: University of Wisconsin -Madison, TA 및 RA
- 1986년 8월 ~ 현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

<주관심분야 : Small metamaterial antennas, antenna optimization, frequency selective surfaces, coupling of guided waves, wireless power transfer>