

논문 2009-3-8

## 전파를 이용한 철산화물 스케일 박막 특성 연구

### Characterization of iron oxide scale films using radio frequency waves

문성진\*, 신동식\*, 윤힘찬\*, 박위상\*\*

Sung-Jin Muhn, Dong-Sik Shin, Him-Chan Yun, Wee-Sang Park

**요약** 본 논문은 철강 제품의 제조 공정 중에 철강 표면에 불규칙하고 불균일하게 형성되는 스케일의 특성 분석에 관한 것이다. 고온에서 제작되는 철강 제품은 공기 중의 산소와 접촉하여 단 시간에 철산화물을 형성하게 된다. 이러한 철산화물을 스케일이라고 한다. 스케일은 철강 제품의 산화막 역할을 하여 제품 표면을 보호하는 역할도 하지만 불균일하게 형성된 스케일은 오히려 철강 제품의 외관을 해치게 되며 추가 공정 시에 적잖은 문제 거리가 된다. 산세공정을 통해 산(acid)으로 스케일을 제거하는 공정이 있지만 이 공정 또한 스케일의 특성 파악이 전제가 되지 않은 상태로 시행되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 보다 효과적이고 효율적인 공정을 위하여 스케일의 특성 파악에 대한 내용을 소개하며, 이에 전파가 이용된다. 전파를 이용하여 스케일의 분포, 접합 특성, 철강 코일의 스케일 분포 등을 연구할 수 있는 실험 장비를 소개한다. 또한 이론적 분석과 간단한 시뮬레이션으로 통하여 이의 타당성을 입증한다.

**Abstract** This paper deals with the analysis of characteristics of the scale non-uniformly formed on the surface of the steel during the steel production processes. The steel made at the high temperature contacts with the oxygen in the air, so forms the scale immediately. The scale has a role to protect the surface of the steel product as a oxide-layer, but the scale formed non-uniformly spoils the exterior of the steel product and occurs the problems about the next processes. There is a pickling process to remove the scale of the steel products, but the real situation is that the pickling process is not also based on the analysis of the characteristics of the scale. Therefore, this paper describe the procedures of the analysis of the scale more effectively using the radio-frequency wave. Using the radio-frequency wave, this paper introduce the experimentations to analyze the distributions of scale, the junction characteristics between the surface of steel and scale and the distributions of scale on the produced steel coil. Also, according to the simple simulations, this paper proves the proprieties about the above contents.

**Key Words :** Scale, Radio frequency wave, Steel-surface layer, Steel oxide-layer

#### I. 서론

현재 국내의 철강 산업은 국내외를 통틀어 순위권내에의 역할을 하고 있는 상태이며, 특히 국내 최대 규모의

철강 제조 회사인 포스코에서는 연간 150만 톤의 철강 제품 및 철강 기자재를 생산하고 있다. 이 중 70%는 국내의 수요에 맞게 공급이 되며, 나머지는 국외로 수출이 되고 있다. 철강 제품은 크게는 건설 현장 및 철 구조물 등과 작게는 일반 가정집에서 흔히 볼 수 있는 양동이나 냄비, 심지어 자동차의 철판에도 사용되고 있다.[1]

이러한 철강 제품의 수요는 공급에 비례하여 끊임없

\*준회원, 포항공과대학교 전자전기공학과

\*\*정회원, 포항공과대학교 전자전기공학과(교신저자)

접수일자 2009.05.18, 수정완료일자 2009.06.10

이 증가하였으며, 이에 발맞추어 철강 제품의 질 향상에 도 많은 발전을 이룰 수 있는 계기가 되었다. 철강 제품의 질을 향상시키기 위한 방법으로는 철강 제조 공정 중의 관리가 효율적으로 이루어져 전반적인 공정 단계에서 철강의 질 향상을 꾀하는 것이다. 공정상의 관리로는 용광로에서 녹여진 선철에서 순수한 철을 분리하고 담금질 및 압연을 반복하는 과정에서 발생할 수 있는 철강의 균열이나 녹의 발생을 방지함을 들 수 있다. 제조 공정 중의 철강은 표면에 녹을 형성하게 되는데, 이러한 녹은 산화철의 한 종류로서 일반적으로 스케일(scale)이라 한다.

철강 제조 공정 중에 스케일이 다량으로 형성되는 공정은 열간 압연 공정으로서 공정이 800~900°C로 마무리가 되기 때문에 공기 중의 산소와 급속도로 산화작용을 하게 된다.[2]

스케일은 일반적으로 철강 표면에 불균일하게 형성되며 이는 철강 외관을 해치며 냉간 압연 공정에 지장을 주는 요인이 된다. 또한 철강 제품의 도금성 및 도장성을 저하시키는 주요 요인이 되기도 한다.[3]

현재 국내 철강 제조의 대표 회사인 포스코에서는 스케일의 분석을 위하여 X선을 이용한 고속 촬영 기술을 사용하고 있지만, 범위가 국소하다는 단점과 육안에 의한 스케일 분포 파악과 별반 차이가 없다는 것이 큰 문제점이다.[4]

따라서 본 논문에서는 스케일의 특성 파악을 위하여 전파를 이용한다. 스케일의 분포와 철강 표면과의 접합 특성 및 완성된 철강 코일에 형성된 스케일 특성 파악에 전파를 이용한 실험과 이에 따른 기대효과를 소개하겠다.

## II. 본 론

### 2.1 스케일의 분포 파악

#### 2.1.1 전파의 특성

스케일의 분포 파악을 위해서 전파를 사용하는 방법은 스케일 층에 직접 전파를 진행시키는 방법과 불균일하게 분포된 스케일에 수직 또는 경사각으로 입사시키는 방법을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 전파의 여러 가지 특성 중 대표적인 세 가지 특성을 사용한다. 그림 1은 이러한 전파의 특성을 나타내고 있다.

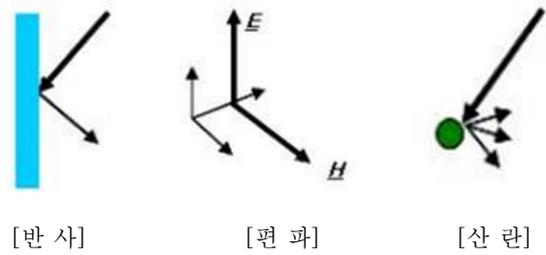


그림 1. 전파의 대표적인 특성  
Fig. 1. Important characteristics of radio-frequency wave

그림 1과 같은 RF wave의 전파 특성과 경계 조건에 의해서 wave는 전파 mode를 가지게 된다. 전파 mode는 wave가 전파해 나가는 선로의 물리적인 모양에 전적으로 의존하며, 선로 사이의 유전율과 투자율에 영향을 받는다. 만약에 선로의 크기와 모양이 정해지고, 선로 사이의 물질이 정해졌다면 그 선로를 전파해 나가는 wave의 dominant mode는 unique하게 결정되게 된다. 하지만, 어떤 이유에서든지 선로 사이의 유전율과 투자율이 변하게 되면 전파 mode는 달라진다. 이러한 개념을 바탕으로 압연을 마친 철강 표면에 발생하는 스케일의 유전율 및 투자율을 mode의 변화를 측정함으로써 파악할 수 있다.

또한 스케일의 유전율을 직접적으로 측정하는 방법은 그림 2에서 그 실험 과정을 보여주고 있다.

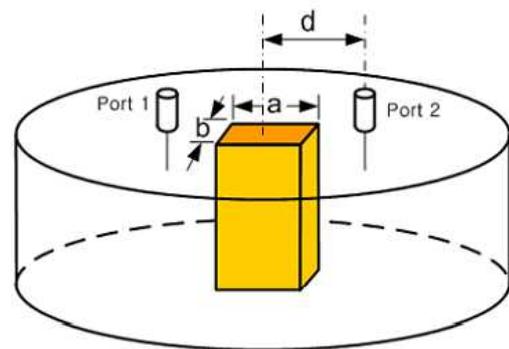


그림 2. 원통형 공진기 excitation 및 시료의 위치  
Fig. 2. Locations of the excitation and sample in the cylindrical resonator

공진기를 이용한 유전율 측정은 microwave 대역에서 일반적으로 사용하고 있고, 가장 많이 사용하는 방법으로 알려져 있다. 이 방법은 미세한 시료를 적절한 방법으로 공진기 속에 넣어서 공진주파수의 변화와 대역폭의 변화를 관찰하여 복소 유전율을 이끌어 내는 방법이다.

이 방법은 높은 sensitivity와 시료들을 비교적 간편하게 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있으나 공진기의 공진주파수에서만 유전율이 측정이 된다는 단점을 가지고 있다. 그러나 근래에는 공진기 내부의 정확한 필드(field)를 정확히 계산할 수 있어 비교적 정확히 유전율을 측정할 수 있다. 유전율을 측정하기 위한 공진기의 구조는 다음과 같다. 실제 공진기를 제작 할 경우에는 각 포트를 excitation 시키는 방법과 시료를 어떻게 넣을지 결정을 하여야 한다. 본 연구에 사용할 방법은 시료를 넣기 위하여 슬롯을 만들었다. 슬롯의 위치는 전계가 가장 강하게 생기는 부분이며 방사가 되지 않도록 유의하여 작게 만들어야 한다.  $TM_{010}$  모드를 형성하기위해 그림 2와 같이 모노폴 형태의 포트를 이용하였다. 각 포트는 동축선으로 구성되어 있으며 중심 도체가 원통형 공진기 안으로 들어가 중심 도체의 전류방향이 형성되는 모드의 전계방향과 동일하게 되어 모드를 형성할 수 있게 된다.

### 2.1.2 이론적 접근 방법

그림 3은 mode의 변화를 대략적으로 표현한 그림이다. 두 개의 철강 강판을 사용하고, 철강 강판을 전송 선로의 형태로 배치한 다음 RF wave를 입사시키는 그림이다. 그림 3의 오른쪽 그림은 실험을 이론적으로 해석할 때 직각 좌표계에 표시한 그림을 나타내고 있다. Parallel plate waveguide 형태로 표현될 수 있으며, 해석 방법 또한 parallel plate waveguide의 해석과 동일하게 할 수 있다.

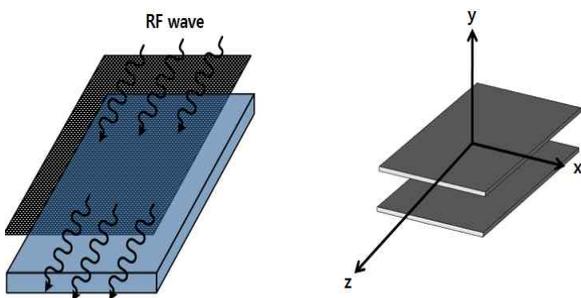


그림 3. 스케일 층을 진행하는 전파의 mode 해석 방법  
Fig. 3. Analysis of wave modes propagating along the scale layer

### 2.1.3 스케일의 분포 파악을 위한 측정 장비

그림 3의 전파 mode 해석 방법을 기반으로 하여 스케일의 특성 파악에 관한 구체적인 측정 장비의 구축이 우

선적인 과제이다. 따라서 철강 강판에 형성된 두께를 가지는 산화철의 특성 연구를 위해서는 추가적인 측정 장비의 설계 및 제작이 병행되어야 한다. 전파를 이용한 실험 장비라는 내용에 기반을 두어야 하기에 신호를 송수신할 수 있도록 고안되어야 한다. 또한 스케일이 철강 강판의 표면에 형성되기 때문에, 전파가 진행되어 가는 방향이 철강 강판의 표면에 제한되어야 한다. 따라서 신호를 주고받을 수 있는 두 개의 표준 안테나와 철강 표면의 스케일에만 전파가 진행될 수 있도록 하는 modulator가 필요하다. 그림 4는 위에서 언급된 내용을 잘 나타내고 있다.

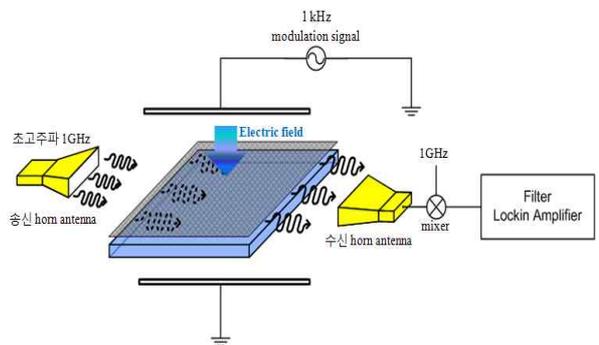


그림 4. 스케일의 분포 파악을 위한 측정 장비  
Fig. 4. Equipments to measure the distributions of scale

그림 4에서 보는 바와 같이 1 GHz의 신호는 철강 강판의 표면에만 위치하게 되며, 철강 표면 이외로 벗어나는 전파는 1 kHz 신호가 작용하는 철강 강판 위아래에 위치한 넓은 판(커패시터 역할)사이에서 발생하는 전기장의 영향을 받지 않게 되어 modulation이 되지 않는다. 따라서 그림 4의 측정 장비는 전파를 이용하여 정확하게 철강 강판 표면에 형성된 스케일의 분포를 파악할 수 있는 것이다.

## 2.2 스케일의 접합 특성 및 철강 코일의 스케일 분석

본 논문에서는 철강 표면과 스케일의 접합 특성을 규명하기 위하여 전파의 제 3고조파를 분석하는 방법을 소개한다. 국소적인 범위에서의 접합 특성을 파악하는데 효과적인 방법이 될 수 있다. 그림 5는 언급된 내용을 나타내고 있다.

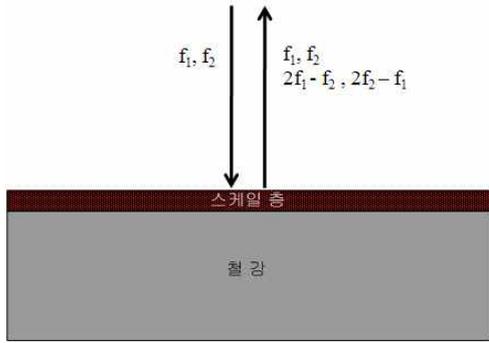


그림 5. 접합 특성에 따른 제 3고조파 발생  
Fig. 5. Equipments to measure the distributions of scale

스케일이 형성된 철강 표면에 주파수  $f_1$ 과  $f_2$ 를 가지는 전파를 인가하면  $f_1$ 과  $f_2$ 뿐 아니라  $2f_1 - f_2$ 와  $2f_2 - f_1$ 의 주파수를 가지는 전파가 반사된다.[5] 이 반사된 전파를 측정하여 스케일 층의 접합 특성을 파악할 수 있다.

또한 제작된 철강 코일의 표면에 형성된 스케일의 분포를 파악하기 위한 실험 방법도 본 논문에서 소개한다. 그림 6은 제작된 철강 코일에 전파를 이용하여 스케일 층에 인가하는 것을 나타내고 있다.

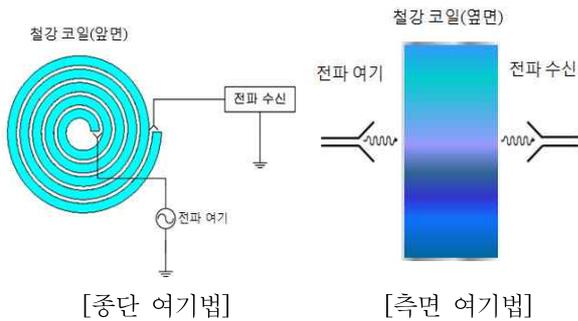


그림 6. 철강 코일에 형성된 스케일 특성 파악을 위한 실험  
Fig. 6. Experimentation to analyze the characteristics of scale on the steel coil

철강 코일에 형성된 스케일은 철강 사이에 위치하게 되므로 전파가 전파해 나갈 수 있는 도파관의 형태를 하게 된다.

따라서 완성된 철강 코일의 스케일 특성 파악을 위해서는 그림 6에 보는 바와 같이 종단 여기법과 측면 여기법을 통한 실험을 해야 한다. 종단 여기법은 코일의 한쪽 끝에 안테나를 이용하여, 형성된 스케일의 길이 방향으로 전파를 인가시켜 다른 한 쪽에서 전파를 수신하여 이를 분석하는 방법이다. 측면 여기법은 코일의 옆면으로

전파를 인가시켜 스케일의 폭방향으로 전파가 전파하여 다른 쪽에서 전파를 수신하는 방법이다. 그림 6의 실험을 통하여 철강 코일에 형성된 스케일의 길이와 폭 방향으로 특성 분석을 하게 되므로 보다 정확한 자료 분석이 가능할 것이다.

### III. 시뮬레이션 및 결과

스케일 층을 따라 전파해 나가는 전파의 특성을 파악하기 위하여 CST를 이용한 시뮬레이션을 하였다. 스케일 층을 유전율을 가지는 dielectric slab으로 두고 전파를 여기시켰다. 그림 7는 시뮬레이션 과정을 보여주고 있다.

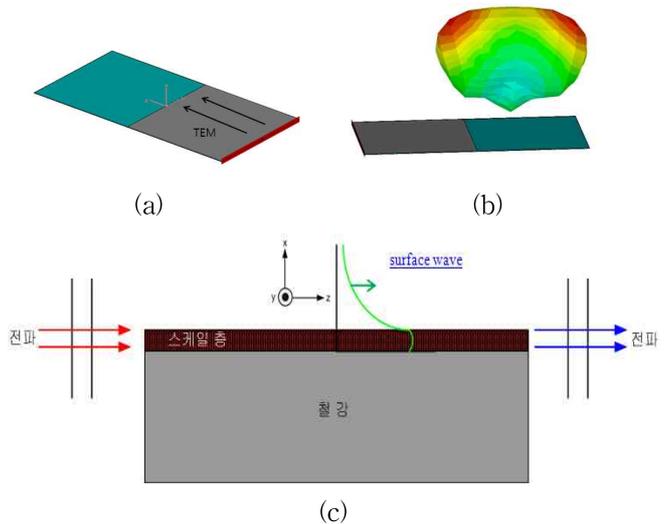


그림 7. 스케일 층의 전파 진행 파악을 위한 시뮬레이션  
(a)시뮬레이션 구조 (b)평판이 제거된 부분에서의 방사필드 (c)진행하는 표면파의 개념도

Fig. 7. Simulations to analyze the wave propagation in the scale layer  
(a) Structure (b) Radiation field in the part except for roof (c) The concepts of surface wave

그림 7의 구조는 두 개의 평판 도파관 사이에 유전체가 삽입된 형태이며, 스케일 층을 표현하기 위하여 위쪽의 평판 도파관의 반을 잘라낸 구조이다. 그림 7(a)에서 빨간색 표시된 부분은 waveguide 포트를 나타내며, 포트에서 TEM 모드가 여기된다. TEM 모드로 여기된 전파가 위쪽 평판의 중간 지점에서 dielectric slab부분만 존재하는 부분을 만나게 되면 일부는 표면파의 형태로 dielectric slab을 따라 진행하며, 나머지 대부분은 방사되

거나 반사된다. 그림 7의 (b)와 (c)가 이를 잘 표현하고 있다.[6] 이 표면파를 modulation하여 스케일 층의 분포 특성을 알아보는 실험이 바로 그림 4의 실험 방법이다.

#### IV. 결 론

현재 국내에서는 철강 표면의 스케일을 국소적으로 파악할 수 있는 연구만이 진행된 상태이며, 효율적인 특성 파악 연구가 미비한 상황이다. 본 논문에서는 철강 제조 공정 시에 고온의 작업 환경으로 인하여 형성되는 스케일의 본질적인 문제점과 현 국내의 스케일 분석 기술을 언급하였다. 또한 국내의 분석 기술의 문제점을 지적 하였으며, 스케일의 특성 파악을 위하여 필요한 이론 및 실험 과정을 소개하였다. 우선 철강 스케일의 물리적인 성질을 파악하기 위하여 원통형 공진기를 이용한 스케일의 유전율과 투자율을 측정하고, 파악된 스케일의 물성을 중심으로 그림 3의 실험으로 불균일한 스케일의 분포를 파악한다. 또한 철강 표면과 스케일의 접합 특성을 규명하기 위해서는 two-tone 테스트를 통하여 입사된 면에서 반사되어 나오는 제 3고조파를 분석하는 실험 방법을 소개하였다. 마지막으로 열간 압연의 제조품은 철강 코일의 완성 단계에서 발생할 수 있는 스케일의 분석을 위해서는 그림 6에 소개된 중단 여기법과 측면 여기법을 사용할 수 있다. 이 방법들은 안테나를 사용하여 정교하게 스케일 층에 전파를 입사시켜 진행되는 전파의 mode 변화를 분석하는 방법으로 전파의 입사 방법에 따라 그 명칭이 정해진다. 본 논문에서 소개된 실험 방법들은 스케일의 특성 파악을 보다 정확하고 효과적으로 하기 위한 것이며, 이는 스케일 제거에 필요한 수많은 추가 공정 및 도금 공정에 기준이 되는 실험 데이터로서 많은 도움이 될 것이다. 또한 스케일을 제거하는 산세 공정에서 스케일의 특성에 따라 공정의 필요성을 판단할 수 있는 지표가 될 것이며, 산의 농도 조절이 가능하게 되어 효율적인 공정이 가능하게 된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] <http://kr.blog.yahoo.com/sea4season/3365>
- [2] <http://www.posteel.com/korea/info/common/steel.htm>
- [3] [http://www.taejoosteel.com/menu\\_des02.htm](http://www.taejoosteel.com/menu_des02.htm), "Pickling process".
- [4] 구희준, 정찬교, "산화피막 저감을 위한 열처리 기술에 관한 연구", Clean Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 41- 53, 1998
- [5] Behzad Razavi, "RF Microelectronics", Prentice communication engineering and emerging technologies series editor, 1998
- [6] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Third Edition, 2003

※ 본 연구는 한국교육과학재단(주관기관: 포항공과대)의 지원으로 수행된 것입니다.

저자 소개

문 성 진(준회원)



- 2006년 경북대학교 전자전기공학과 학사 졸업.
- 2009년 포항공과대학교 전자전기공학과 석사 졸업.
- 2009년 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정 재학.

<주관심분야 : 무선전력전송 시스템, 루프 안테나, 철강 공정 및 철강 스케일 분석 연구>

신 동 식(준회원)



- 2009년 강원대학교 전자전기공학과 학사 졸업.
  - 2009년 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정 재학
- <주관심분야 : small antenna, UTP X-talk analysis>

윤 힘 찬(준회원)



- 2009년 경북대학교 공과대학 전자공학과, 학사 졸업.
  - 2009년 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정 재학
- <주관심분야 : metamaterial antenna, 철강 스케일 분석 연구>

박 위 상(정회원)



- 1974년 서울대학교 공과대학 전자공학과, 학사 졸업.
- 1982년 University of Wisconsin-Madison 전자공학과, 석사 졸업.
- 1986년 University of Wisconsin-Madison 전자공학과, 박사 졸업.
- 2009년 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

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