

Rayleigh Wave를 이용한 KTX 제동 디스크의 균열 검출 시스템 개발

Development of Nondestructive System for Detecting the Cracks in KTX Brake Disk Using Rayleigh Wave

김민수*, 염윤택**, 박진현**, 송성진**, 김학준**†, 권성덕***, 이호용*

Min Soo Kim*, Yun Taek Yeom**, Jin-Hyun Park**, Sung Jing Song**, Hak Joon Kim**†,
Sung Duck Kwon*** and Ho Yong Lee*

초 록 최근 KTX (Korean Train Express) 열차의 사고의 대부분은 기기의 오작동, 차량 부품의 노후화에 따른 고장 및 장애발생, 신호장치에 대한 인적오류 등이 주된 원인이었다. 특히, 차량부품 중 제동 디스크의 파손은 하부 차축 및 차륜에 충격을 가해 탈선의 우려와 고속 충돌 등 대형 인명 피해를 낳을 수 있다. 따라서 본 연구에서 KTX의 제동 디스크(Solid Type, Ventilation Type)를 형상화하고, 이를 동작시켜 균열을 측정하여 DB화할 수 있는 균열검출시스템을 구축하였다. 제동 디스크의 표면균열을 검사하기 위하여 Rayleigh wave를 이용하였으며 수침기법으로는 제동디스크 장착상태에서 탐상의 어려움이 인하여 국부수침 탐상기법을 활용하여 제동디스크의 초음파 검사모듈을 개발하였다. 또한 제동디스크의 회전에 따라 측정된 균열을 저장할 수 있는 균열검출 자동화장치와 제동 디스크의 초음파 검사모듈을 이용하여 제동 디스크의 표면결함을 평가하였다.

주요용어: 제동 디스크, 표면파, 표면결함, 레일리 파, 다이내모메타 모사시스템

Abstract Recently, KTX (Korean Train Express) train stoppage accidents were mainly caused by malfunctioning equipment, aging and cracking of railway vehicles, crack breakages of brake disks, and breakages of brake disks. Breakage of brake disk can cause large-scale casualties such as high-speed collision and concern about derailment by hitting lower axle and wheel. Therefore, in this study, a brake disk with solid and ventilation type, which is the brake disk of a KTX train was modeled, and a dynamometer system was constructed to operate the disk. A Rayleigh wave was used to inspect the surface of the brake disk. An ultrasonic inspection module was developed for the brake disk by using a local immersion method due to the difficulty involved in ultrasonic inspection using an existing immersion method. In addition, the surface defects of the brake disk were evaluated using a dynamometer mock-up system and an ultrasonic inspection module of the brake disk.

Keywords: Disk Brake, Surface Wave, Surface Crack, Rayleigh Wave, Dynamometer Mock-up System

1. 서론

국내 고속철도 KTX (Korea Train Express)는 2004년 4월에 개통과 더불어 도시와 도시를 연결하여 전국을 하나의 생활권으로 만들었고, 항공기나 버스와 달리 안개, 폭설, 폭우와 같은 기후의 영향을 거의 받지 않으며 탄소 배출량이 적고

소음도 상대적으로 적어 차세대 운송 수단으로 각광 받고 있다. 이는 지역 간의 이동성 및 접근성을 향상시켜 인적 자원 및 물적 자원을 원활히 교류하는 결과를 가져다주었다. 그러나 고속으로 승객 및 화물을 이송하는 과정에서 발생할 수 있는 안전사고는 경우에 따라서 막대한 인적·경제적 손실을 초래할 수 있다[1,2].

[Received: November 10, 2016, Revised: December 15, 2016 / January 18, 2017, Accepted: February 2, 2017] *한국철도기술연구원, **성균관대학교 기계공학과, ***안동대학교 물리학과, † Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea (E-mail: hjkim21c@skku.edu)



Fig. 1 Photo of surface cracks on KTX disk brake

최근 KTX 및 KTX-산천의 열차 사고가 빈번히 발생하고 있으며, 대부분 차량의 오작동으로 인한 열차의 멈춤 사고지만, 제동 디스크의 파손 및 레일의 손상은 차량의 탈선 및 대형 인명사고를 초래할 수 있다. 이 중 제동 디스크의 파손은 표면에 발생하는 열 피로균열이 성장함으로써 제동 디스크의 파손이 발생하게 된다[3,4].

Fig. 1은 KTX 제동 디스크에서 발생된 실제 결함 사진이며, 디스크 안쪽에서 바깥쪽 방향으로 결함이 발생하며, 결함이 깊이 방향으로 성장하며, 점차 갈라지는 형상으로 성장하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 KTX 제동 디스크의 표면 균열을 검출하기 위하여, 열피로균열을 형상화한 표준시험편을 제작하였고, 균열 검측 시스템을 개발하여, 결함 깊이와 초음파간의 상관관계를 이용하여 균열 성장의 추이를 분석할 수 있는 관계식을 도출하였다.

2. 결함 검출의 원리 및 평가

2.1. Rayleigh Wave의 이론

본 연구에서는 KTX 제동 디스크의 표면 균열을 비파괴 방식으로 정밀하게 검측하기 위해서 Rayleigh wave를 이용하였다. Rayleigh wave는 액체 - 고체의 경계면에서 초음파가 레일리 각 근

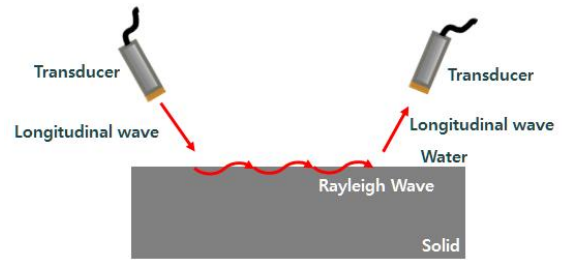


Fig. 2 Conceptual drawing for detection of surface cracks using Rayleigh wave [6]

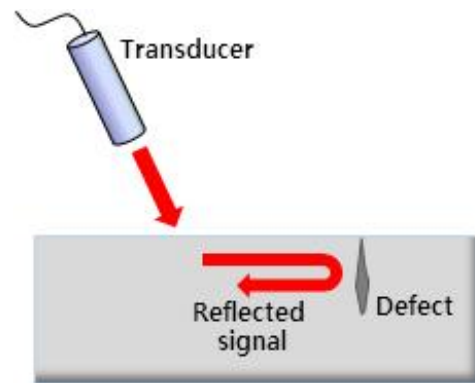


Fig. 3 Reflected Rayleigh wave by surface crack

처에 도달했을 때, 모드 변환을 통해서 발생하며, 이때 발생한 Rayleigh wave는 전체 에너지의 약 90%가 표면에 집중되어 전파가 되는 특징을 갖는다. 또한, Rayleigh wave가 표면 결함 평가에 대한 우수한 분해능을 보여주는 것은 연구를 통해 이미 입증되었다[5].

Fig. 2는 Rayleigh wave를 이용한 KTX 제동 디스크 표면결함 검사에 대한 개념도이다.

2.2. 균열 검출 원리

초음파를 이용한 탐상 기법은 크게 pulse-echo 기법과 pitch-catch 기법 두 가지로 나뉜다.

Pulse-echo 기법은 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다.

Pulse-echo 기법은 하나의 탐촉자를 이용하여 초음파 신호를 송·수신하며, Rayleigh 각으로 입사된 초음파는 모드변환을 통해서 Rayleigh wave로 변하게 되고, 이는 표면을 따라 전파한다. 표면결함에 맞고 반사된 신호는 송신 탐촉자로 되돌아가서 결함 반사 신호가 수집된다. 이때, 결함의 크기가 커질수록 반사되는 초음파의 에너지는 점차 증가하는 경향을 보인다[5].

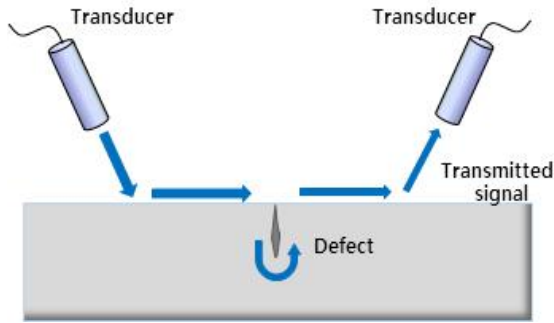


Fig. 4 Transmitted Rayleigh waves through a surface crack

다음으로, Pitch-catch 기법은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

Pitch-catch 기법은 두 개의 탐촉자를 이용하여 초음파 신호를 각각 송신 및 수신하며, Rayleigh 각으로 입사된 초음파는 모드변환을 통해서 Rayleigh wave로 변하고, 표면을 따라 전파한다. 표면결합에서 투과된 신호는 반대쪽의 수신 탐촉자로 수집된다. 이때 결함의 크기가 커질수록 투과되는 초음파의 에너지는 점차 감소하는 경향을 보인다[5].

2.3. 검사 모듈 설정

본 연구에서는 초음파검사 모듈의 최적 탐촉자를 선정하여 초음파검사 모듈에 적용하였고 각각 실험 및 시뮬레이션을 통해서 증명하였다.

Fig. 5는 실제 KTX 제동 디스크의 조각이며, Fig. 5를 이용하여 물성평가를 진행하였다. 시험편의 종파 속도는 5972 m/s이며, Rayleigh wave 속도는 2873 m/s로 측정되었으며, 이와 유사한 물성을 갖는 SM45C를 활용하여 검사 기법 선정을 위한 실험 수행 시 사용될 표준시험편을 제작하였다.

각 결함의 크기는 폭 0.5 mm, 길이 10 mm, 깊이 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm로 방전 가공을 하였다.

Fig. 6은 제작된 표준시험편을 보여주고 있다.

2.3.1. 검사 기법 및 주파수 선정

초음파검사 모듈에 적용될 검사 기법을 선정하기 위해서 각각 pulse-echo 기법과 pitch-catch 기법 및 2.25 MHz(0.5")와 5 MHz (0.5")의 평면형 탐



Fig. 5 Photo of solid type disk brake in the KTX

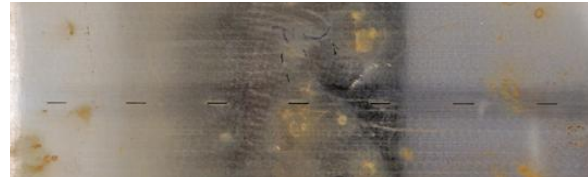


Fig. 6 Reference specimen with 7 surface breaking cracks

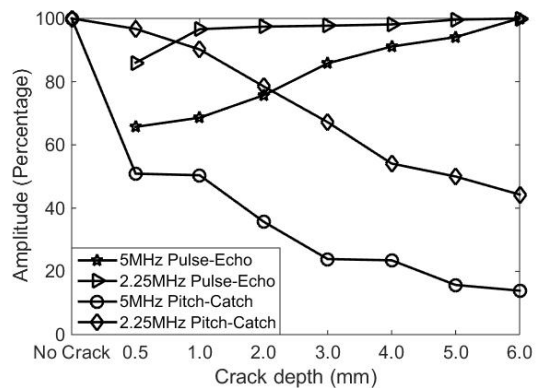


Fig. 7 Comparison of amplitude (in percentage) acquired surface cracks in the reference specimen with different inspection setup

촉자를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 각각의 기법 및 주파수에 대하여 수집된 결함신호의 진폭을 측정하여 결함의 크기에 따라 나타냈으며, 진폭이 제일 큰 값을 기준으로 규격화를 수행하였다.

Fig. 7의 5 MHz 및 2.25 MHz의 pulse-echo 기법은 결함의 크기가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 하지만, 결함 크기에 따른 진폭의 차이가 크지 않았기 때문에, 결함 크기의 성장을 분석하기에는 어려움이 있으며, 5 MHz의 pitch-catch 기법은 결함 크기가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보이지만, 0.5 mm와 1.0 mm 결함신호의 진폭이 비슷하기 때문에 결함 성장 거동을 분석하기에 어려움이 있다. 하지만 2.25 MHz의 pitch-catch 기

법은 결함의 크기가 커짐에 따라서 선형적으로 감소함을 확인할 수 있으며 결함의 성장 거동을 분석하기에 유리함을 확인할 수 있다. 또한 주파수는 결함 검출 분해능과 관련이 있으며, 분해능은 파장(λ)에 반비례한다. 2.25 MHz의 파장은 약 1.33 mm이고, 5 MHz의 파장은 약 0.6 mm이다. 5 MHz의 주파수는 2.25 MHz보다 높은 분해능을 갖지만, 짧은 파장으로 인해 상대적으로 1 mm 이상의 결함에 대한 결함의 투과가 불리하다.

2.3.2. 탐촉자 형상 선정

초음파검사 모듈에 적용될 탐촉자의 형태를 선정하기 위해서 상용 FEM (finite elements method) 시뮬레이션 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 Rayleigh wave의 거동 특성을 가시화하였고 국부수침탐상법을 형상화하여 시뮬레이션을 설정 하였다.

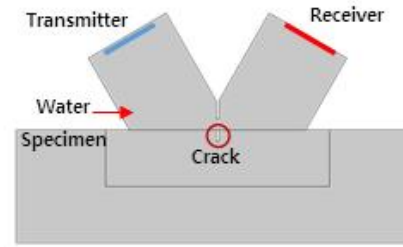
Fig. 8과 같이 각각 평면형 탐촉자와 집속형 탐촉자를 모사하고, 송신 위치에서 식(1)과 같은 초음파 신호를 가진하였다. 또한 집속형 탐촉자의 집속거리는 1"로 설정하였다.

$$[1 - \cos(\frac{2\pi ft}{2})]\cos(2\pi ft) \quad (1)$$

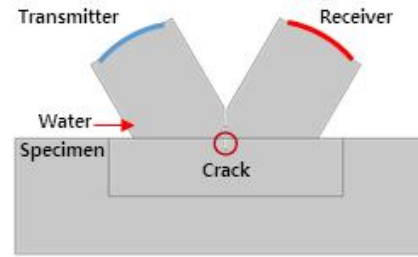
식(1)의 f 는 주파수, t 는 시간을 나타내며, 중심 주파수는 2.25 MHz, 물의 Mesh는 0.05 mm이며, 시험편의 Mesh는 0.1 mm로 설정하였으며, 결함의 크기는 2.3절의 결함 크기와 동일하게 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 9는 시간에 따른 평면형 탐촉자의 초음파 거동 시뮬레이션의 결과이다. (a)는 송신 탐촉자에서 초음파가 가진되는 것을 확인할 수 있으며, (b)는 물과 시험편 표면에서 모드 변환을 통해서 Rayleigh wave가 발생하는 것을 확인할 수 있다. (c)는 Rayleigh wave가 표면결함에 투과하는 것이며, (d)는 표면결함에 투과된 초음파가 수신 탐촉자로 신호가 수집됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 시간에 따른 집속 탐촉자의 초음파 거동 시뮬레이션의 결과이다. (a)는 초음파가 송신 탐촉자에서 가진되는 것을 확인할 수 있다. (b)는 집속형 탐촉자의 초음파 빔이 표면에 집속되어 모드변환을 하여 Rayleigh wave가 발생하고 (c)는 표면에 응집된 Rayleigh wave가 표면결함과 맞닿



(a)



(b)

Fig. 8 Schematic diagram of: (a) planar transducer (b) focused transducer with 1" focal length

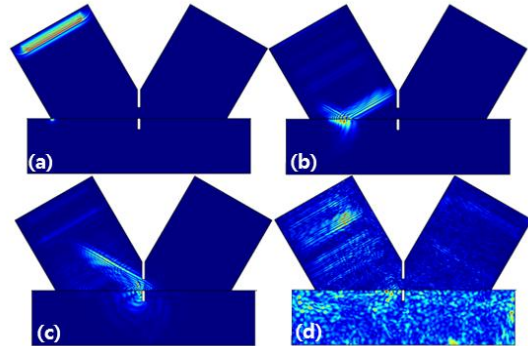


Fig. 9 Simulation result of planar transducer screen shot at (a) 2 μ s, (b) 13 μ s, (c) 17 μ s and (d) 36 μ s

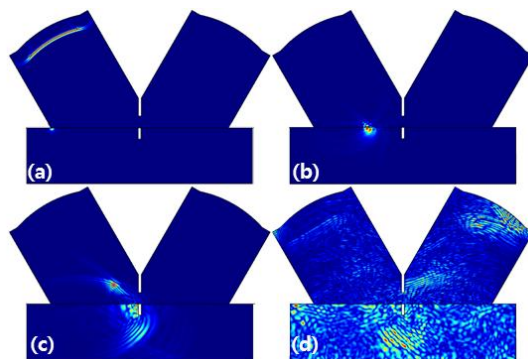


Fig. 10 Simulation result of focused transducer : screen shot at (a) 2 μ s, (b) 13 μ s, (c) 17 μ s and (d) 36 μ s

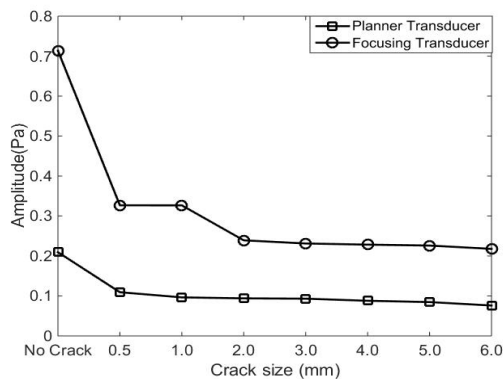


Fig. 11 Comparison of amplitude acquired surface cracks in simulation result

는 것이고, (d)는 수신 탐촉자로 평면형 탐촉자보다 더 큰 에너지가 수집되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 탐촉자의 형태에 따른 결함 신호의 진폭을 각각 나타낸 그래프이다.

Fig. 11은 평면형 탐촉자의 결함 투과 신호와 집중형 탐촉자의 결함 투과 신호의 진폭을 각각 분석하여 비교한 그래프이며, 결함의 크기에 따라 집중형 탐촉자의 결함 투과 신호가 더 크게 수집되는 것을 확인할 수 있다.

실험 및 FEM 시뮬레이션의 결과에 따라서 탐촉자는 2.25 MHz 집중 탐촉자를 사용하여 pitch - catch 기법으로 실험을 수행하는 것이 가장 제동 디스크의 균열 측정에 용이함을 예상할 수 있다.

3. KTX 제동 디스크의 균열 검출 시스템 개발

본 연구에서는 KTX 제동 디스크의 균열 검출을 위한 시스템을 개발하였으며, 각각 다이내모메타 시스템, 스캐너 모듈, 초음파검사 모듈로 구성되어 있다.

3.1. 시험편 제작

본 논문에서는 다이내모메타 모사 시스템에 사용될 solid type의 제동 디스크 모사시험편을 제작하였으며, 시험편의 물성은 2.3절에 나타낸 물성과 동일하게 수행하였다.

Fig. 12는 solid type의 제동 디스크 모사시험편이며, 실제 solid type의 제동 디스크와 동일한 크기인 외경 $\Phi 640$ 과 내경 $\Phi 140$ 으로 구성되었으며, 결함의 크기는 Fig. 6과 동일하게 제작하였다.



Fig. 12 Solid type mock-up disk brake specimen

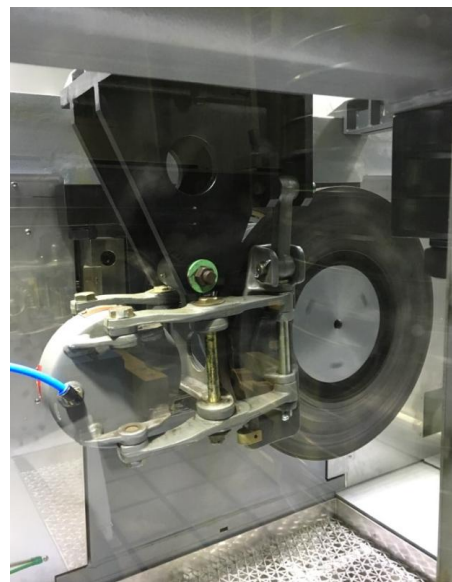


Fig. 13 Photo of dynamometer system

3.2. 다이내모메타 모사 시스템 개발

Fig. 13은 실제 제동디스크에 대한 균열시험을 수행할 다이내모메타의 시험부에 장착된 제동디스크 및 캘리퍼이며, 실제 KTX의 주행모드를 통한 제동 디스크의 제동 실험을 수행하는 시스템이다. 본 논문에서는 제동 디스크 균열 검출 시스템을 개발하기 위해서 다이내모메타 시스템을 모사한 모사 시스템을 설계 및 제작하였다.

Fig. 14는 제작된 다이내모메타 모사시스템이며, (a)는 시험편을 회전시키는 동력원인 모터이고 (b)는 Fig. 12의 시험편이며 (c)는 시험편을 회전시키는 회전동력을 전달하는 축이다. (d)는 프레임으로 전체적인 시스템을 지지하는 구조로 되어 있으며 알루미늄 프로파일 6060으로 제작되었다.

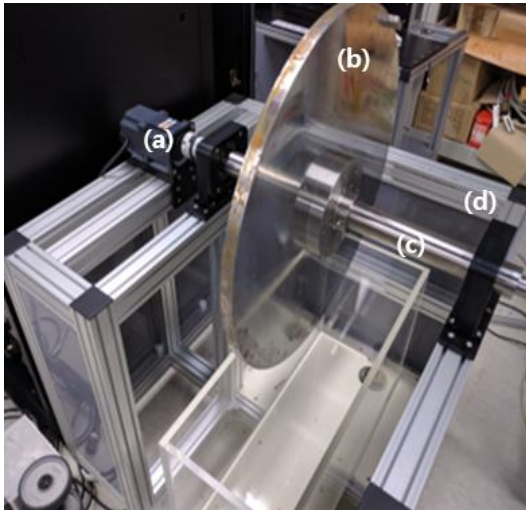


Fig. 14 Photo of fabricated dynamometer mock-up system; (a) motor, (b) specimen, (c) shaft and (d) frame

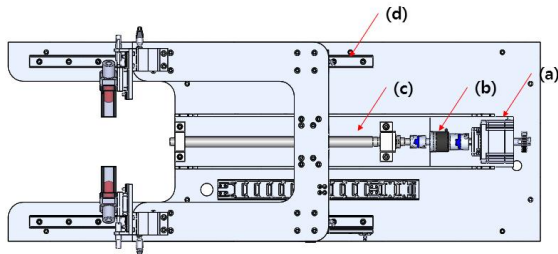


Fig. 15 Schematic drawing of scanner module; (a) stepping motor, (b) encoder, (c) ball screw, (d) LM guide

3.3. 스캐너 모듈 제작

Fig. 15는 설계 프로그램으로 설계된 스캐너 모듈이며 (a) 스텝핑 모터, (b) 엔코더, (c) 볼 스크류, (d) LM가이드로 구성되었으며, 스캐너의 스캔 거리는 500 mm로 전체 시험편의 반 이상을 커버할 수 있도록 제작하였으며, LM가이드와 볼 스크류에 이물질 및 물의 유입을 방지하기 위해서 스캐너에 커버를 씌어주었고, LM가이드 및 볼 스크류의 재질을 SUS로 제작하여 물에 대한 부식을 미연에 방지하였다.

Fig. 16은 제작된 스캐너 모듈이다.

3.4. 초음파검사 모듈 제작

2.3절의 결과를 이용하여 초음파검사 모듈을 개발하였다. Fig. 17은 설계된 초음파검사 모듈이다.

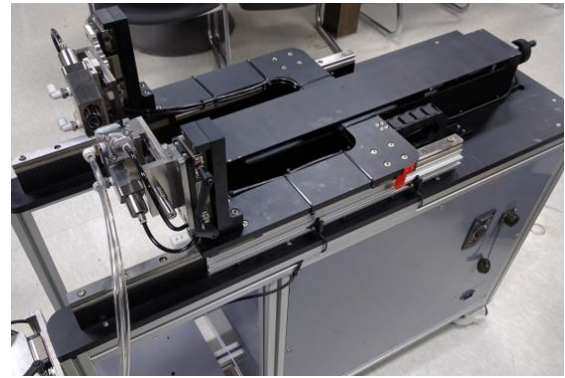


Fig. 16 Photo of fabricated scanner module

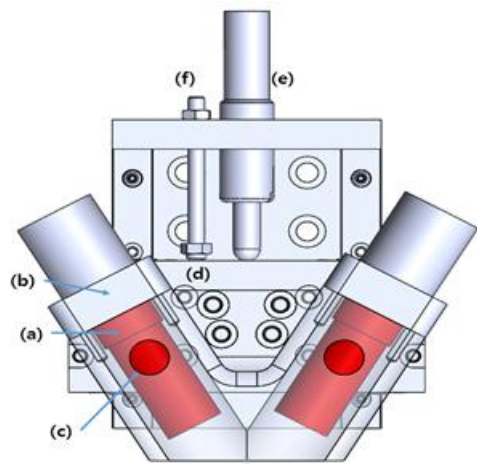


Fig. 17 UT inspection module; (a) transducer, (b) wedge, (c) water support port, (d) wedge jig, (e) ball plunger and (f) stopper

Fig. 17의 (a)는 탐촉자이며, (b)는 Rayleigh wave를 발생시키는 웨지이고, (c)는 물 공급 라인이며, (d)는 웨지를 LM가이드에 고정시키는 지그이다. (e)는 웨지 지그를 밀면서 시험편과 웨지를 밀착시키는 용도를 가진 볼 플런저이고, (f)는 시험편과 웨지가 밀착되었을 때, 시험편의 표면 구조로 인하여 웨지 모듈이 뒤로 밀릴 경우를 방지하기 위해 부착된 스토퍼이다.

4. 실험 결과

3장에서 개발한 KTX 제동 디스크 균열 검측 시스템을 이용하여 3.1절에서 모사한 KTX 제동 디스크 결함 모사시험편에 대한 실험을 수행하였으며, 2.3절에서 설정된 검사 모듈을 활용하였으며, 각각 2.25 MHz 평면형 탐촉자와 집속형 탐촉자를 사용하여 FEM 시뮬레이션 결과를 증명하였다.

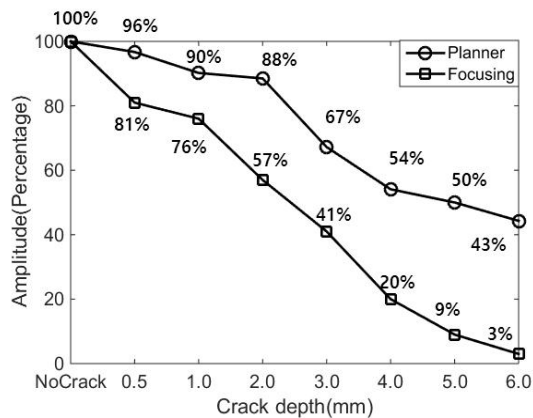


Fig. 18 Relation between percentage of transmitted amplitude using crack size (in depth)

Fig. 18는 탐촉자의 형태에 따른 실험 결과를 나타낸 것이며, 결함이 없는 투과파의 진폭을 기준으로 하여 규격화를 진행하였다.

결함의 크기가 커질수록 결함 신호의 진폭이 작아지는 경향을 보이며, 결함 신호의 진폭이 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

탐촉자의 형태에 따라 결함에 대한 결함 신호 진폭의 감소폭이 다르며, 평면형 탐촉자의 경우는 0.5 mm 결함을 기준으로 약 5% 내외로 감소하는 경향을 보이며, 2.0 mm 결함과 3.0 mm 결함 간 결함 신호 진폭의 감소가 급격히 이뤄지는 것을 확인할 수 있다.

집속형 탐촉자일 경우는 결함에 대한 의존성이 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 표면에 집중된 초음파의 음압이 결함을 통과하면서 급격히 감소되는 것이며, 0.5 mm 결함을 기준으로, 약 15~20%씩 감소하는 경향을 보이며, 5.0 mm 결함과 6.0 mm 결함일 경우는 결함의 감소폭이 적음을 확인할 수 있다. 또한 6 mm의 신호의 진폭이 작기 때문에, 6 mm 이상의 결함에 대해서는 신호 수집에 어려움이 있을 것으로 예상할 수 있다.

평면형 탐촉자보다 집속형 탐촉자일 경우, 결함에 대한 의존성이 큰 것을 확인할 수 있으며 이는 표면에 집중된 Rayleigh wave의 음압이 결함을 통과하면서 급격히 감소되는 것이다. 평면 탐촉자일 때는 표면에 집중된 Rayleigh wave의 음압이 집속형 탐촉자보다 적기 때문에 결함에 대한 의존성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 18의 실험 결과를 통해서 집속형 탐촉자가 평면형 탐촉자보다 결함의 크기에 따른 상관관계

를 분석함에 있어 더욱 용이함을 확인하였다.

Fig. 18의 집속형 탐촉자의 실험 결과를 이용하여 결함의 크기에 따른 투과파 진폭의 상관관계를 분석하였고, 식(2)과 같은 관계식을 얻었다.

$$Amp = 0.0039d^2 - 0.4787d + 3.5366 \quad (2)$$

단, Amp는 신호의 진폭을 나타낸 것이고, d는 결함의 깊이를 나타낸 것이다.

도출된 상관관계식을 활용하면 제안한 균열 검측 시스템을 통해 수집된 신호의 진폭을 통한 결함의 크기를 유추할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Rayleigh wave를 이용하여 제동 디스크의 표면결함을 검사하기 위한 초음파검사 모듈을 개발하였으며, 제동디스크 표면균열의 진단을 시험할 제동다이아모메타의 시험부를 모사한 모사 시스템을 제작하고, 이를 검사할 수 있는 스캐너 모듈을 개발하였다.

실험 결과를 통해서 결함의 크기가 커질수록 결함 신호의 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 결함과 투과파 진폭의 상관관계를 분석하여 식(2)과 같은 상관관계식을 도출하였다.

현재 개발된 제동 디스크 균열 검측 시스템은 2.25 MHz, 0.5"의 집속형 탐촉자를 사용하였으며, 약 6 mm 이하의 결함을 측정할 수 있고 도출된 상관관계식을 이용하여 결함의 성장 거동을 확인할 수 있다. 또한 6 mm 이상의 결함을 검사할 때는 주파수와 분해능의 상관관계를 고려했을 때 2.25 MHz보다 더 낮은 주파수를 갖는 탐촉자를 사용하면 되지만, 낮은 주파수를 갖는 탐촉자의 직경이 대부분 1" 이기 때문에, 결함을 측정하는데 어려움이 있을 수 있다. 따라서 탐촉자의 형태는 초음파가 다른 곳으로 분산되지 않도록 하는 집속형 탐촉자를 사용하고, 탐촉자의 집속거리는 최소화 한다면, 6 mm 이상의 결함을 검사할 수 있을 것으로 예상된다.

하지만 깊이 방향 및 검사 방향에 대해 경사진 결함은 검사가 어려울 것으로 예상된다. 따라서 결함의 형상 및 경사진 각도에 따른 추가적인 연구의 필요성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. N. Zheng and J. H. Rho, "Empirical analysis for the effect of the inter-regional express rail system (KTX) on the change of the relative dependency between regions in Korea," *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 50, No. 7, pp. 141-153 (2015)
- [2] J. U. Jo and M. J. Woo, "The impacts of high speed rail on regional economy and balanced development," *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 263-278 (2014)
- [3] C. W. Lee, "High-speed railway vehicle collision and derailment safety evaluation research," *Autumn Conference on The Korean Society for Railway*, pp. 33-38 (2006)
- [4] S. G. Kim, H. C. Park, S. J. Hwang and S. I. Kim, "Improvement of processing way of brake disk and a wheel axle boss seat in Busan Metro Line 3," *Spring Conference on The Korean Society for Railway*, pp. 79-85 (2016)
- [5] Y. T. Yeom, H. J. Kim, S. J. Song, S. S. Kang and S. D. Kwon, "Study on an ultrasonic method for detecting micro-defect by using the leaky Rayleigh wave," *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 65, No. 2, pp. 199-204 (2015)
- [6] Y. T. Yeom, H. G. Lee, H. J. Kim, S. J. Song and S. D. Kwon, "A Study on the behavior characteristics of leaky Rayleigh waves for the detection of crack-like defect," *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 66, No. 2, pp. 1-6 (2016)