

# 초음파를 이용한 알루미늄 다이캐스팅 회전자 내부 결함 검출능 평가에 관한 연구

이준현\*, 최상우\*\*

## Detectibility of Internal Defects in Aluminum Die-casted Rotor Using Ultrasonic Technique

Joon-Hyun Lee\*, Sang-Woo Choi\*\*

### ABSTRACT

The aluminum die-casting technique has been widely used to manufacture a rotor in motor industry because of its highly productivity, even though it sometime causes the various type of defects in the rotor, such as shrinkage, cavity, blow holes etc. which results in the decrease of the efficiency of system. Therefore the development of reliable technique to detect the flaws in the rotor is strongly needed not only to control quality assurance but to improve its efficiency. In this study, the wide variety of ultrasonic techniques have been applied to detect the flaws in the rotor and then to discuss the detectibility of the flaw and the applicability for NDE tool in the aluminum die-casting rotor.

**Key Words** : Ultrasonic Testing(초음파검사법), Rotor(회전자), Die-casting(다이캐스팅), Nondestructive Evaluation(비파괴평가)

### 1. 서론

유도전동기의 원리는 1820년 D.F. Arago 에 의해 움직이는 영구자석을 이용하여 원판을 회전시키는 원판실험에서 시작된 이후 고정 전자석을 이용하여 회전자계를 발생시키는 실험 등이 수행되어 그 기본 원리가 확고히 되었다. 그 후 전동기 기술은 급속한 발전을 거듭하여 이론적 해석, 설계법 등이 완성되었으며 현재 그 효율 향상에 관한 연구가 진행되고 있다. 고효율전동기는 국내의 경우 KS C 4202 의 규격치를 상회하는 즉, 규격상의 표준 유도전동기의 효율 대비 4~5%가 향상된 효율을 가지는 유도전동기를 지칭한다. 그 예로

정격출력이 18.5 kW 인 2극 표준 유도전동기의 효율규격은 88.5% 이상이고 고효율 유도전동기의 효율규격은 92% 이상이다. 근래 국내에서 생산되는 유도전동기 중 상당부분이 다이캐스팅으로 회전자(rotor)를 제작하고 있으며 다이캐스팅의 특성상 생산된 회전자의 바(bar) 안에 크기가 큰 블로우홀(blow hole), 크기가 작은 핀홀(pin hole) 및 응고시 발생하는 수축공동 등이 회전자 바의 전기적 성능과 기계적 성능을 떨어뜨리고 있다. 고효율 유도 전동기는 일반 유도 전동기와 달리 효율이 높은 관계로 다른 모든 부분의 상태가 양호하더라도 유도 전동기의 속도-토크 특성, 손실(특히 2차동손, 표류부하손)과 밀접한 관계가 있는 회전

~ 2001년 7월 25일 접수.  
\* 부산대학교 기계공학부  
\*\* 부산대학교 대학원

자의 다이캐스팅 상태가 좋지 못한 경우 속도, 토오크 특성뿐만 아니라 제반 전기적 특성 부분에 영향을 미치므로 다이캐스팅 상태 검사 기술을 통한 양질의 회전자를 공급해야만 할 필요가 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 회전자 다이캐스팅 성형 상태 검사 기술은 선진국등에서도 확보하지 못한 실정이며, 독일, 일본 등의 일부 선진국에서도 현재 부분적인 회전자 검사를 위한 방법들이 개발되고 있으나 이들 방법마저 국내에 도입하고자 할 경우 막대한 기술료를 요구하고 있는 실정이다. 한편 국내에서는 회전자를 회전시키고 원심력을 측정하여 밸런싱웨이트(balancing weight)라는 철판을 회전자의 엔드링(end-ring)부에 부착시켜 회전자의 편심을 보정하는 밸런싱테스트(balancing test)나 회전자를 절단하여 외관 검사를 행하는 등의 파괴 및 간접적인 방법으로 다이캐스팅 결함을 평가하고 있는 실정이다. 그러나 밸런싱테스트의 경우 회전자에 나타나는 편심은 다이캐스팅 결함 뿐만이 아닌 회전자 철심(steel core)의 외경 가공시의 기계적 에러에 의한 것이기 때문에 다이캐스팅 상태를 파악하고 품질 개선을 위한 자료로 이용하기 어려우며, 외관검사의 경우는 회전자를 파괴시켜야 하므로 경제적인 면에서 부적합하므로 다이캐스팅 상태에 대한 뚜렷한 검사방법이 없는 실정이다. 그러므로, 회전자 다이캐스팅의 상태 파악이 어렵고, 축적된 데이터 부족으로 지속적인 품질관리나 다이캐스팅 기술개발에 이용할 수 있는 자료가 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 고효율 유도전동기 개발을 위하여 해결해야할 필수적인 과제 중에 하나인 회전자의 알루미늄 다이캐스팅 상태검사 기술을 확보하는 것으로 회전자를 파괴시키지 않는 경제적이고 신뢰성 높은 비파괴 검사방법의 확립에 있다. 본 연구에서는 회전자 내부결함 검출을 위하여 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법을 이용하였으며, 본 연구에서 적용된 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 구조물 내부에 존재하는 결함의 신뢰성 있는 평가 방법으로 널리 사용되고 있다.<sup>(7-9)</sup> 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법에는 접촉식 탐상법, 수침법 등이 있고, 특히 수침법에서 사용되어지는 탐촉자중에는 평면 탐촉자(flat transducer), 점집속 탐촉자(point focusing transducer), 선집속 탐촉자(line focusing transducer) 등이 있다. 본 연구에서는 회전자 내부의 결함을 검출하기 위하여 앞에서 열거된 다양한 방법의 초음파를 이용하는 비파괴 평가 방

법의 적용을 시도해 보았다.

## 2. 회전자의 제작 및 내부 결함

### 2.1 알루미늄 다이캐스팅 방법에 의한 회전자(rotor)의 제작 원리 및 회전자 구조

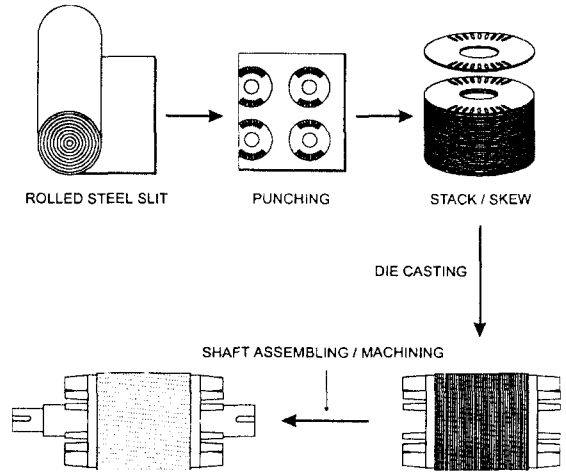


Fig. 1 Process diagram of manufacturing rotor

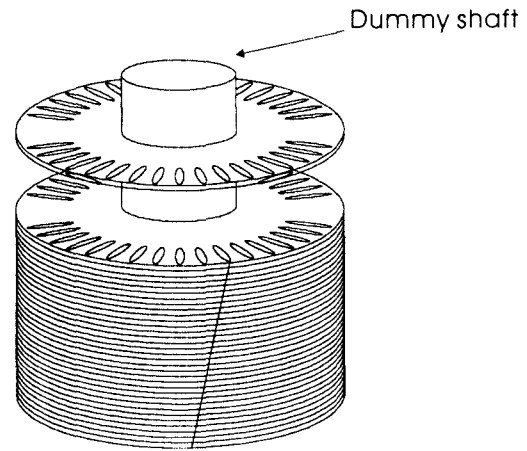


Fig. 2 Stacking of steel core

알루미늄 다이캐스팅 회전자의 제작 과정을 Fig.1에 나타내었고 철심(steel core)의 형상과 적층 방법을 Fig.2와 Fig.3에 나타내었다. 철심은 압연된 강판으로부터 냉간에서 타발되어 적층된다. 고조파 회전자계 때문에 기동시에 이상 토오크를 발생함과 동시에 진동이 발생하는 경우가 있으므로

대부분의 경우 이 현상을 제거하기 위해서 철심을 적층 시킬 때 Fig.2 와 같이 경사지게 적층한다. 그리고 다이캐스팅 시에 철심을 고정하기 위하여 보조축(dummy shaft)이 삽입되며 Fig.3 과 같이 슬롯중 하나가 열려있는 경우도 있다. 그 다음 적층된 철심내의 슬롯 안으로 다이캐스팅을 행하여 알루미늄을 채우게 된다. 그후에는 보조축이 제거되고 열박음 방법을 이용하여 축을 삽입하고 회전자의 외경을 가공하게 된다.

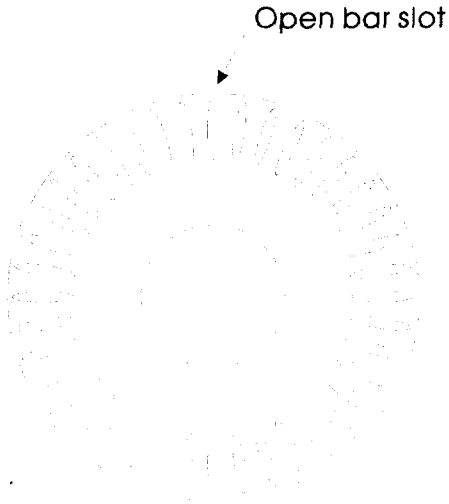


Fig. 3 Open bar slot in cross section of rotor

2.2 다이캐스팅에 의해 발생하는 내부결함의 분류 및 특성

Table 1 Defects in aluminum die-casting rotor

Shrinkage cavity	Macro shrinkage
	Filamentary shrinkage
	Micro shrinkage
Defect by including gas	Gas hole, blow hole
	Gas porosity
Shrinkage defect in cooling	Hot tears

일반적으로 알루미늄 다이캐스팅 방법에 의하여 제조되는 회전자의 내부 결함은 다이캐스팅 알루미늄 주물의 수축 등에 의하여 다양한 크기 및 형상으로 발생하게 되며, 이들은 Table 1 에 나타낸

것과 같이 다양한 결함 분류 및 형태를 나타내게 된다. 즉, 다이캐스팅후 주물의 냉각과정에서 수축에 의한 수축공동이 발생하기도 하고, 주물에서 빠져나가지 못한 가스의 포집에 의하여 기공 또는 기포가 발생하기도 한다. 다이캐스팅중에는 알루미늄이 열팽창되어 있는 상태이므로 상온으로 냉각되면서 상당한 열수축이 유발된다. 이때 알루미늄 다이캐스팅 주물 주위의 철심이 열수축 저항으로 작용하게되어 주물내부에 잔류 인장응력이 발생하게 된다. 이때 발생하는 열수축에 의한 잔류 인장응력에 의하여 알루미늄 다이캐스팅 바가 파단되는 결함(hot tear)이 발생하기도 한다.

3. 시험편 및 실험방법

본 연구에서는 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법에 대한 회전자 내부결함의 검출능을 평가하기 위하여 다음과 같이 회전자의 내부에 외경으로부터 깊이가 다른 인공결함을 가공하여 그 내부결함을 검출하고자 하였다. 즉, Fig.4 와 같이 회전자 내부에 회전자의 외경으로부터 네 가지 거리의 지름이 6mm 인 축 방향의 드릴 홀(drill hole)로써 외경에서 가까운 순서에 따라 A, B, C, D 네 개의 내부결함을 가공하였고, 동일한 회전자의 각 결함에 대하여 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법중에서 접촉식 탐상법과 수침식 탐상법(immersion testing)으로 결함을 검출하고자 하였다.

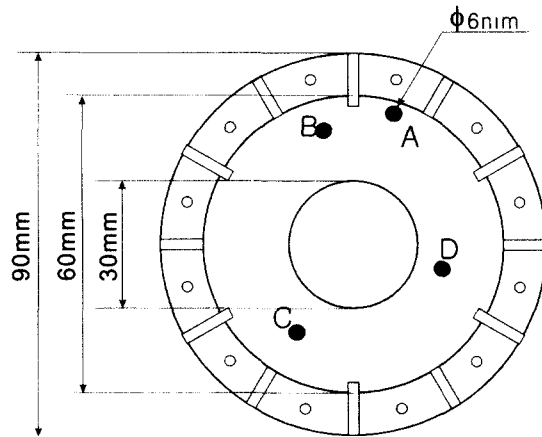


Fig. 4 Artificial defects in rotor

Table 2 에서는 본 연구에 있어서 적용한 각종 초음파 시험 내용 및 그때 사용한 각 주파수 특성 등을 요약하여 나타내었다. 접촉식의 경우 1MHz 와 5MHz 의 두 가지 주파수의 탐촉자를 사용하였다. 수침식에서 고출력 탐상기(USIP-11, Krautkrämer)를 사용한 경우는 5MHz 의 평면 탐촉자와 점집속 탐촉자 및 선집속 탐촉자를 사용하였으며 집속 탐촉자의 경우 초점거리는 50mm 이다. 그리고 수침식에서 고주파 탐상기(HIS-1, Krautkrämer)를 사용한 경우에는 25MHz, 50MHz, 80MHz 의 점집속 탐촉자를 사용하였으며 각각의 탐촉자에 대하여 초점거리가 12.5mm, 25mm, 50mm 의 3 가지 렌즈를 사용하여 총 9 가지의 방법을 적용하였다.

Table 2 Summary of ultrasonic test and these frequency characteristics

Testing Type	Pulser & Receiver	Frequency	Focusing type and focal length	
Contact	USIP-11	1MHz		
		5MHz		
Immersion	USIP-11	5MHz	Flat	
			Point focusing	Focal length: 50mm
		Line focusing		
	HIS-1	25MHz	Point focusing	Focal length: 12.5mm
		50MHz	Point focusing	Focal length: 25mm
		80MHz	Point focusing	Focal length: 50mm

### 3.1 접촉식 탐상

접촉식 탐상법에서 중심주파수(center frequency) 가 1MHz 와 5MHz 로 주파수가 낮은 고감쇠 재료용의 광대역(broad band) 탐촉자 2 종을 사용하여 회전자 내부의 결함을 탐상하였다. 회전자 측면의 곡면과 접촉식 탐촉자의 접촉을 위하여 아크릴로 만든 딜레이라인(delay line)을 사용하였다. 이때 출

력전압 1,000V 를 사용할 수 있는 고출력 탐상기를 사용하였다.

1MHz 및 5MHz 의 탐촉자를 사용하여 접촉식 탐상법을 실시한 경우 네 가지 결함 중 어느 하나의 결함에코도 전혀 검출할 수 없었다. 특히 Fig.5 의 결과는 Fig. 4 에서의 결함 C 를 검출하기 위하여 5MHz 의 탐촉자를 사용하여 접촉식 탐상법에 의해 수신한 초음파 파형으로 회전자의 표면에서 반사된 표면에코와 축에서 반사된 저면에코만이 검출될 뿐 결함 C 에 대한 뚜렷한 에코를 검출하지 못함을 나타내고 있다. 이는 회전자 내부로 전파된 초음파 빔이 결함에 집속되지 못하고 산란되었기 때문이다.

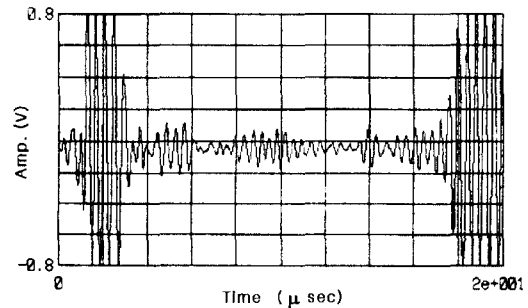


Fig. 5 Ultrasonic waveform in contacting test using 5MHz transducer (Defect C)

### 3.2 수침식 탐상

5MHz 수침용의 평면 탐촉자, 점집속 탐촉자, 선집속 탐촉자를 사용하여 회전자 내부의 드릴 홀을 검출하고자 하였다. 사용한 탐촉자의 초점거리는 모두 50mm 이다. 특히, 시험편 형상이 실린더형이므로 가장 높은 초음파 에너지를 송수신할 수 있을 것으로 사료되는 선집속 탐촉자의 결함 검출능에 대하여도 조사하였다. 본 시험에서도 앞의 접촉식 탐상법과 동일하게 고출력 탐상기를 사용하여 회전자 내부결함에 대한 초음파 파형을 측정하였다. Fig.6, Fig.7, Fig.8 은 수침식 탐상법을 나타낸 것으로, Fig.6 의 사진은 본 연구에서 사용한 수침식 탐상장비를 나타내며, 수조속에 회전자가 수평방향으로 위치하고 수침용 탐촉자는 회전자의 위쪽에 수직으로 위치한다.



Fig. 6 Immersion testing

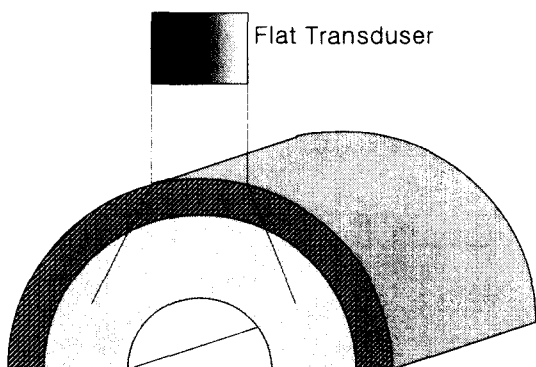


Fig. 7 Immersion testing with flat transducer

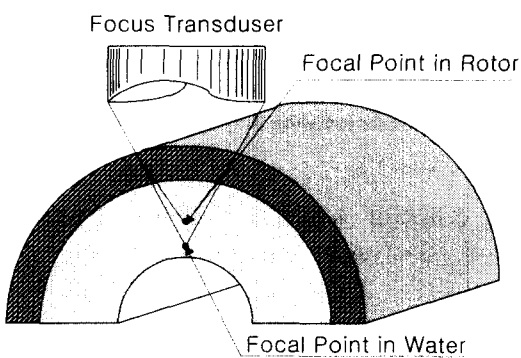


Fig. 8 Immersion testing with focusing transducer

Fig.7 은 본 연구에서 적용된 평면 탐촉자를 사용한 수침법을 나타낸 것이고, Fig.8 은 집속 탐촉자를 사용한 수침법을 나타낸 것으로 초음파 탐촉자와 시험대상체인 회전자가 모두 물속으로 수침되어 있는 상태이다. 평면 탐촉자를 사용한 Fig. 7 에서 물과 회전자의 음속 차이로 인하여 회전자 내부로 입사된 초음파 빔은 굴절하여 확산되며 따라서 초음파 빔은 분산되고 그 음압의 세기가 감소하게 된다.

집속탐촉자를 사용한 Fig. 8 에서는 집속렌즈를 사용하였으므로 초음파 빔은 점집속 탐촉자인 경우 한 점에 집속되며, 선집속 탐촉자인 경우 회전자의 축에 평행한 방향의 한 선상에 집속된다. 이때 회전자 내에서의 음속은 물의 음속 보다 빠르므로 초점 거리는 물속에서의 초점거리보다 짧아진다.<sup>(10)</sup>

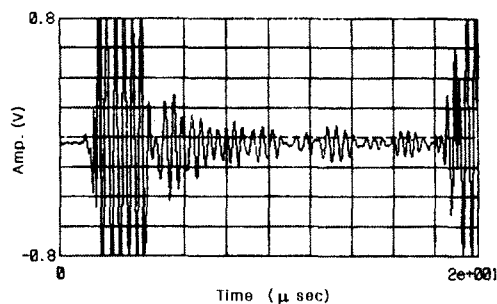


Fig. 9 Ultrasonic waveform in immersion test using 5MHz flat transducer (Defect D)

수침법 중에서도 평면 탐촉자를 사용하는 경우에는 Fig. 4 의 모든 결함 즉, 결함 A, B, C, D 에 대한 결함에코를 검출하지 못하였다. 대표적으로 결함 D 의 탐상을 위해 5MHz 의 평면 탐촉자를 사용하여 수신한 초음파 파형을 나타낸 Fig.9 에서 회전자 표면에서 반사된 표면에코와 축에서 반사된 저면에코 사이에 결함에서 반사된 결함에코가 검출되지 못함을 보여주고 있다. 이것은 앞의 접촉시 탐상법에서와 동일하게 즉, Fig.7 에서 언급한 바와 같이 초음파 빔이 회전자 내부로 입사되어 집속되지 못하고 오히려 넓게 분산되었기 때문이다.

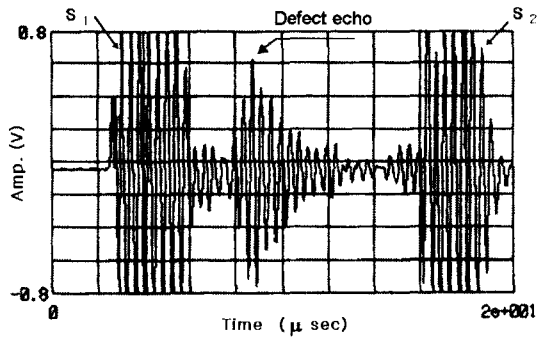


Fig. 10 Ultrasonic waveform in immersion test using 5MHz point focusing transducer (Defect A)

점집속 탐촉자를 사용한 경우에는 모든 결함에 대하여 에코를 검출하지 못하였던 평면 탐촉자를 사용한 경우와 달리 외경으로부터 거리가 가장 짧은 결함 A로부터 반사되는 결함에코를 검출할 수 있었다. Fig.10은 5MHz 점집속 탐촉자를 사용하여 수침법으로 수신한 초음파 파형으로서 S<sub>1</sub>은 회전자의 표면에서 반사된 표면에코이고 S<sub>2</sub>는 회전자의 축에서 반사되는 저면에코이다. S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub> 사이에 결함에서 반사된 결함에코가 검출되고 있음을 보여주고 있다. 그러나, 점집속 탐촉자를 사용한 수침법에서는 외경에서의 거리가 결함 A보다 멀리 위치한 나머지 결함 B, C, D의 결함에코를 검출하지 못하였다.

본 연구의 경우에서 탐상 대상체가 실린더(cylinder)형이므로 가장 높은 초음파 에너지를 송수신할 수 있을 것으로 예상되었던 선집속 탐촉자를 사용한 경우의 결과에서는 결함 A, B, C에 대한 결함에코를 검출할 수 있었다. Fig.11은 5MHz의 선집속 탐촉자를 사용하여 수침법으로 결함 B에 대한 결함에코를 수신한 결과의 초음파 파형이다. 이 결과의 초음파 파형에서는 표면에코와 저면에코 사이에 결함 B에서 반사된 결함에코가 검출되고 있음을 보여주고 있다. 그리고 본 결과의 결함에코의 진폭은 앞의 점집속 탐촉자를 사용하여 수신한 결함 A에 대한 에코보다 낮은 진폭값을 나타내고 있다.

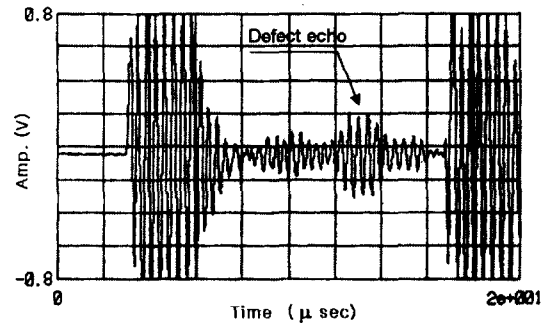


Fig. 11 Ultrasonic waveform in immersion test using 5MHz line focusing transducer (Defect B)

그러나 선집속 탐촉자를 사용한 경우 모든 결함을 검출하지는 못하고, 외경에서 가장 먼 거리에 위치한 결함 D의 경우에는 Fig.12에서와 같이 회전자의 표면에서 반사된 표면에코와 축에서 반사된 저면에코만이 검출되며 결함 D에서 반사되는 결함에코가 검출되지 못하였다.

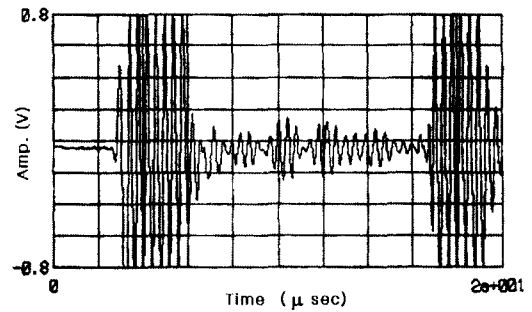


Fig. 12 Ultrasonic waveform in immersion test using 5MHz line focusing transducer (Defect D)

### 3.3 고주파수의 초음파를 이용한 수침식 탐상

출력전압이 300V 이고 고주파, 고분해능 탐상기를 사용하여 회전자 내부결함을 검출하고자 하였다. 25MHz, 50MHz, 80MHz의 3가지 주파수의 수침용 탐촉자와 각각의 경우에 12.5mm, 25mm, 50mm의 3가지 초점거리의 점집속 렌즈를 사용하여 총 9가지 방법으로 회전자 내부결함 검출 시험을 수행하였다. 앞의 집속형의 저주파 탐촉자를

사용하여 결함 A 또는 결함 A, B, C 를 검출했던 결과와는 다르게 본 고주파의 초음파를 이용한 결과에서는 모든 결함에 대하여 결함에코를 검출할 수 없었다. 이것은 고주파 초음파의 높은 감쇠(attenuation) 때문이며, 선집속 탐촉자와 고주파의 사용이 가능한 고출력 탐상기를 사용하면 검출능을 증가시킬 수 있으리라 사료된다. 따라서, 초음파를 이용한 회전자 내부결함 검출에 관한 본 연구의 결과로부터 출력전압이 높은 탐상기와 수침용 선집속 탐촉자를 사용한 경우에 한하여 내부결함의 검출이 가능하였으며, 이 경우에도 네 개의 결함 중에서 외경으로부터 짧은 거리에 위치한 세 개의 결함만이 검출 가능하였으므로 신뢰성 있는 결함 평가 방법이 되지 못하였다. 이것은 강관이 적층되어 제조된 철심을 가지는 회전자의 구조적인 특성이 그 원인이며 따라서, 알루미늄 다이캐스팅 회전자의 내부결함에 대하여 획기적으로 개선된 결함 검출방법의 개발이 필요하다.

#### 4. 결론

이상의 초음파를 이용한 알루미늄 다이캐스팅 회전자 내부결함 검출능 평가를 위한 연구결과로부터 다음의 결론을 얻게 되었다.

초음파를 이용한 비파괴 평가 방법중의 접촉식 탐상법에 의해서는 알루미늄 다이캐스팅 회전자 내부결함을 검출할 수 없었다. 그러나, 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법중 5MHz 점집속 탐촉자를 사용한 수침법에서 회전자 내부결함중 외경에서 가장 짧은 거리에 위치한 결함 A 만이 검출 가능하였다. 한편, 5MHz 선집속 탐촉자를 사용한 초음파 수침법에서 결함 A, B, C 의 검출이 가능하였고, 외경에서 가장 먼 거리에 위치한 결함 D 의 검출은 불가능하였다. 따라서, 결함의 검출능을 개선하기 위하여 초점 거리가 짧은 선집속 탐촉자와 출력 전압(1,000V 이상)이 높은 고출력 초음파 탐상기가 필수적이다. 한편, 본 연구에서 25MHz, 50MHz, 80MHz 의 고주파 초음파를 이용한 방법에서는 재료내부 초음파의 감쇠로 인하여 결함의 검출이 불가능하였다.

#### 후기

본 연구는 부산대학교 교내연구비 및 한국과

학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성 평가센터의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Austin H. Bonnett, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-cage Induction Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 4, pp. 921-937, 1992.
2. Austin H. Bonnett, "Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, pp. 1124-1130, 1988.
3. 포항공과대학교, "다이캐스팅 알루미늄 용해 기술개발," 고효율 유도전동기 개발사업 중간 발표회 초록집 II, pp. 191-203, 1995.
4. 포항공과대학교, "다이캐스팅 알루미늄 용해 기술개발," 고효율 유도전동기 개발사업 중간 발표회 초록집 III, pp. 85-99, 1996.
5. Lee, J.H., Choi, S.W., Lee, M.R., Park, M.J., "Application of Novel Hall Sensor Technique to Evaluate Internal Defect in Squirrel Cage Rotor," Review of Progress in Quantitative NDE," pp. 63, 2000.
6. Lee, J.H., Choi, S.W., Park, M.J., "Evaluation of Internal Defects in Squirrel Cage Rotor by Novel Hall Sensor Technique," 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2001) Proceeding, pp. 1929-1933, 2001.
7. 이준현, 최상우, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정," 대한기계학회논문집 A, 제 24 권, 제 1 호, pp. 52-61, 2000.
8. 최상우, 이준현, "초음파 판파와 신경회로망을 이용한 리벳홀 부위 균열 크기 평가," 한국비파괴검사학회 '98 춘계학술발표회 논문집, pp. 117-127, 1998.
9. 장경영, 장효성, 박병일, "초음파주사 현미경의 분해능 향상을 위한 중첩된 펄스에코 신호의 분리 기법 (디킨블루션과 웨이브렛 변환의 혼합기법)," 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 7, pp. 217-225, 2000.
10. S. Birks, R. E. Green. Jr, Ultrasonic testing, Nondestructive testing handbook, Vol. 7, 1991.