

터빈 로타 디스크의 초음파탐상을 위한 초음파탐촉자의 지향성 및 탐상범위

원순호*, 장홍근*, 조경식*, 이종오*, 이종규**

* 한국기계연구원 비파괴시험그룹

** 부경대학교 물리학과

요 약 터빈 디스크에서 발생하는 결함에 대한 초음파탐상기술을 확립하기 위하여 초음파탐촉자의 근/원거리 음장 및 지향성에 대하여 연구하였다. 영광원자력 LP터빈 No. 6 디스크와 동일하게 대비시험편을 제작하였고 터빈로타 디스크의 초음파탐상에 사용된 5MHz PZT 압전탐촉자의 직경에 따른 근/원거리 음장 및 지향성을 계산하고 실험을 통하여 확인하였다. 썸키와 디스크로 구성된 실험계에서 bore면에 깊이 2mm 및 4mm 인공결함을 지닌 시편과 직경이 0.5inch이고 중심 주파수 5MHz인 초음파탐촉자를 이용하여 계산 및 실험을 수행하였고 그 결과를 비교, 분석하였다. Keyway 영역에 발생한 결함의 탐상능력을 평가하기 위하여 내부의 53mm 및 75mm 지점에 초음파탐촉자를 두고서 45° 및 90° 경사각 초음파탐촉자를 설치한 경우를 가정하여 결함의 탐상영역을 결정하였다.

1. 서 론

터빈과 같은 회전기계류에 있어서 휠의 회전에 의한 여기력이 회전효과(cyclic effect)를 유발시킴으로서 휠 및 blade의 진동을 야기시킨다. 휠에 의한 진동은 낮은 고유주파수를 가지는 반면 blade의 진동은 높은 고유주파수를 갖게 되고, 노즐에 의한 비균일성 증기속도 분포 및 저주파 여기에 의한 압력, 속도 및 로타의 비틀림 진동에 의한 균열이 발생하게 된다. 형상에 의존하는 고유주파수가 진동의 여기력과 같아질 때 공진이 발생하게 되므로 예상하지 못한 균열이 발생하게 된다. 디스크형 터빈인 고리 및 영광원자력발전소의 제작사(WH, GE)에서는 균열성 결함이 자주 발생하고 있는 디스크부에 대한 검

사를 권장하고 있다. 또한 외국에서 많은 손상사례가 발생하고 있어 현재 고리 및 영광원자력발전소에서는 제작사에 기술용역으로 검사를 수행하고 있는 실정이므로 국내에서 자체적인 기술 개발이 필요한 실정이다^{1,2)}. 외국의 예를 보면 사용년수 3.5년 부터 디스크 균열은 발생될 수 있고 미국의 SWRI가 조사한 보고서에 의하면 미국내 조사 대상 원전 72기 중 33기가 이러한 균열현상이 있음이 보고되고 있다³⁾. 또 균열 부위도 keyway, rim attachment, bore면 등 다양하여 광범위한 연구가 다년간 수행되어야 한다^{4~6)}.

이러한 결함에 대한 초음파탐상기술의 확립을 위해서는, 사용하는 초음파탐촉자의 근/원거리 음장 및 지향성에 대하여 정확히 파악을 하여야 한다. 그러

나, 터빈로타 디스크의 형상이 매우 복잡하여 이론적으로 바로 접근하기 어렵고 대상물의 주변에 여러 가지 부착물 때문에 잡음신호와 결합신호의 구별 및 결합의 크기에 대한 평가가 대단히 어려운 실정이다⁷⁾.

본 연구에서는 터빈로타 디스크의 결합탐상에 사용하는 초음파탐촉자의 근/원거리 음장 및 지향성을 썬키와 디스크로 구성된 복합적인 전파경로에 대하여 실험과 이론으로 구한다.

2. 이론적 배경

음향변환자에서 발생하는 음장은 크게 두 영역으로 나뉜다. 그 중 하나는 음향변환자 근처의 음장으로 근거리음장(near field)이고, 다른 하나는 음향변환자에서 멀리 떨어진 원거리음장(far field)이다. 근거리음장은 간섭현상이 현저하게 일어나는 Fresnel 회절영역이고, 원거리음장은 간섭이 일어나지 않는 Fraunhofer 회절영역이라고도 한다^{8,9)}. 음향변환자를 간단히 Fig. 1과 같이 반경이 a 인 원판으로 가정하고 표면에 수직방향으로 단조화진동을 한다고 가정하면, 임의지점의 음압은

$$P(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 k}{2\pi} \int_S \frac{e^{j(\omega t - kr')}}{r'} dS \dots\dots\dots (1)$$

이다¹⁰⁾. 여기서 ρ_0 , c , U_0 , k 및 ω 는 각각 밀도, 음속, 최대입자속도, 파수 및 각 진동수이고, r' 은 음향변환자의 미소체적과 관측점 사이의 거리를 말한다. 거리 r' 은

$$r' = (\gamma^2 + a^2 - 2r\sin\theta\cos\phi)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

이며, γ 은 음향변환자의 중심에서 관측점사이의 거리이다.

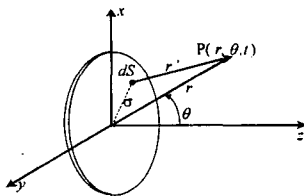


Fig. 1. Geometry used in deriving the radiation characteristics of a flat piston

음압강도 I 와 음압진폭과는

$$I = \frac{P^2}{2\rho_0 c} \dots\dots\dots (3)$$

의 관계가 있고 D 를 음향변환자의 직경이라 할 때 근거리음장의 거리 $N_{near\ field}$ 는

$$N_{near\ field} = \frac{D^2 - \gamma^2}{4\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

로 나타내고 있으나, $\lambda \ll a$ 인 경우는 근사적으로

$$N_{near\ field} = \frac{a^2}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

로 나타낸다. 이때 근거리음장 위치에서 음압강도가 0이 되는 첫 번째 점을 음향변환자의 중심으로부터 연결하면 윗각 γ_0 가 얻어지며 이 각은 회절론에 따라 식 (6)과 같이 계산된다¹¹⁾.

$$\sin \gamma_0 = 1.2 \frac{\lambda}{D} \dots\dots\dots (6)$$

3. 실험

본 연구에서는 영광원자력 LP터빈 No.6 디스크와 동일하게 제작한 대비시험편의 keyway 및 bore면에 폭 0.5mm, 깊이가 2, 4mm이고 길이가 102mm인 인공노치를 방전 가공하여 제작하였다. Panametrics사의 초음파탐촉자중에서 지름 0.5inch, 중심주파수 5MHz인 초음파탐촉자를 Fig. 2의 형상을 갖는 썬키와 결합하여 실험하였다. 썬키의 설계 및 제작은 직육면체의 plexiglass를 탐상 디스크 표면의 3차원 곡면에 일치하도록 밀면을 절삭하였고 디스크의 탐상목표점과 썬키위의 초음파탐촉자 입사점을 Snell's law에 따라 계산하여 제작하였다¹⁾. Bore면에 방전 가공된 인공노치 2mm와 4mm를 대상으로 초음파탐촉자를 디스크 안쪽 53mm 지점에 위치시켜 노치의 중심에서 바깥쪽 표면의 원주 시계 방향 및 반시계 방향으로 0.2°를 간격으로 측정하였다. 실험에 사용한 각각의 개괄도는 Fig. 3과 같고, W_0 , W_{45° 및 W_{90° 의 위치에서 빔이 입사할 때 결합과 이루는 빔각도가 0°, 45° 및 90°를 이루므로 이러한 위치에서의 주사를 수직방향 주사, 경사각 45° 주사 및 경사각 90° 주사라고 명명하였다.

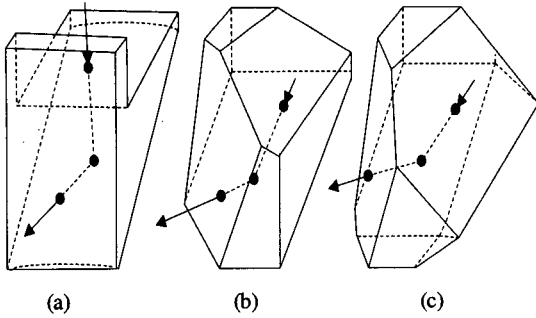


Fig. 2. Basic shape of wedges for (a) radial scan, (b) tangential 45° scan, and (c) tangential 90° scan

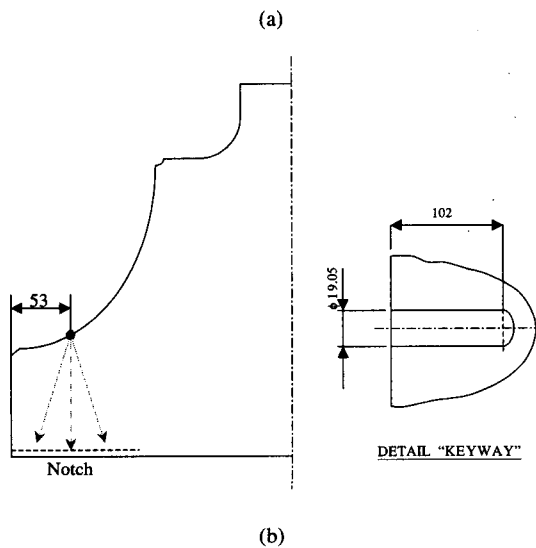
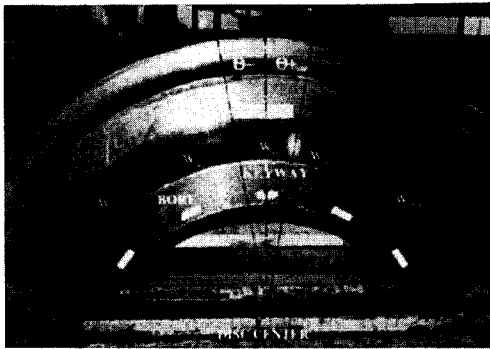


Fig. 3. The conceptual drawing of the inspection of a disc

4. Computer Simulation 절차

현재 계산하고자하는 내용은 해석함수를 각각의 좌표 및 각도를 정확히 행하여야하기 때문에 사용된 program은 MapleV release 2이었다.

4.1. Program A와 Program B

Fig. 3 (a)와 같이 디스크의 전면에서 보았을 경우에 대하여 지향각을 계산하는 것을 목적으로 하였다. Simulation 설정은 다음과 같다.

① 디스크 내부 53mm지점에 썸에 결합된 초음파탐촉자가 있고 0.5 inch 및 1 inch의 직경을 가진 초음파탐촉자를 사용하였다고 가정하였다.

② W_0 에 대하여 대칭이기 때문에 오른쪽에 해당하는 요소만을 계산하였고, 지향각은 식 (6)에 의하여 계산하여 초음파탐촉자의 중심에서 초음파가 방사된다고 가정하였다. 이 경우는 원거리음장에 대하여 계산하였으며, 썸과 디스크의 경계면에서 Snell's law에 의하여 굴절한다고 설정하였다. 이때 썸 내에서는 종파로 진행하다가 디스크의 내부에서는 횡파로 진행한다고 설정하였다.

4.2. Program C와 Program D

Fig. 3 (b)와 같이 디스크의 측면에서 보았을 경우에 대하여 keyway에 도달하는 초음파에 대한 고찰을 행하였다. 4.1의 가정과 같고 simulation 설정은 다음과 같다.

① 터빈 디스크위에 썸과 결합된 초음파탐촉자를 놓았을 때를 위하여 썸층의 두께를 고려하였다.

② 썸기위의 초음파탐촉자에서 발생한 초음파가 keyway의 내부 53mm 지점에 입사하도록 설정하기 위하여 ray-tracing을 역순으로 행하여 초음파탐촉자의 중심을 설정하였다. 이러한 과정은 현재 계산 중인 ray가 순조롭게 계산이 진행되고 있는지를 확인하는데 중요한 인자가 된다.

③ 근거리음장이라면 keyway의 어떠한 범위에 입사하는지를 계산하기 위하여 근거리 음장 영역에서 계산을 수행하였다.

④ 원거리음장이라면 초음파탐촉자를 W_0 점에 두어서 지향각을 계산하여 시계방향 및 반시계방향으로 나누어서 keyway의 도달지점을 계산하였다.

4.3. Program E와 Program F

4.2의 경우와 같으나, 다만 디스크 hub로부터 안쪽으로 75mm 지점에 대하여 계산하였다.

5. 결과 및 토의

5.1. 근/원거리 음장

본 연구에서는 터빈로타 디스크의 복잡한 형상 때문에 앞에서 기술한 근거리음장 이론 및 지향각에 대하여 0.5 inch 및 1 inch의 직경을 갖는 5MHz 초음파탐촉자에 대하여 계산하였다. 각각의 초음파탐촉자에 대하여 근거리음장을 계산한 결과는 각각 63mm 및 253mm이었다. 디스크의 내부 d=53mm인 경우에 대하여 실제 수직방향 주사, 경사각 45° 및 90° 주사시에 각각의 음파전달거리는 약 150mm, 190mm 및 389mm이었고, d=75mm인 경우에 대하여 실제 수직방향 주사, 경사각 45° 및 90° 주사시에 각각의 음파전달거리는 약 177mm, 222mm 및 435mm이었다. 0.5 inch의 직경을 갖는 5MHz 초음파탐촉자의 경우에는 전부 원거리음장의 영역에 있음을 알 수 있고, 1 inch의 직경을 갖는 5MHz 초음파탐촉자에 대하여 계산결과와 비교하면 수직방향 주사는 근거리음장이고 경사각 45° 및 90° 주사는 원거리음장에 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서도 공진 주파수가 5MHz이고 직경이 0.5 inch인 초음파탐촉자에 대한 기본적인 실험과 계산을 수행하였다.

5.2. 디스크의 수직방향에 대한 탐상각도 측정

Fig. 4는 60dB 증폭률을 설정하여 각도를 변화시켰을 경우에 결함에 의하여 발생하는 에코의 상대적인 크기를 나타내었다. 디스크내에서의 전파 파형은 횡파이고, 여기서 사용하는 각도는 Fig. 3 (a)에서 θ 로 나타낸 각도를 말한다. 이러한 각도를 이제부터는 탐상각도라고 통칭한다. 결함의 크기가 2mm와 4mm인 경우의 상대적인 진폭의 최대값은 거의 동일하고, 탐상각도에 따른 변화도 거의 비슷함을 알 수 있다. 즉 Fig. 4에 나타난 바에 의하면, 결함의 크기에 관계없이 최대 탐상각도는 약 1.2°가 됨을 알 수 있다. 이는 초음파탐촉자가 결함의 수직방향

에서 $\pm 1.2^\circ$ 내에 있으면 탐지가 가능하다는 것을 의미하고 있다.

Program A는 5MHz, 0.5 inch 초음파탐촉자를 사용하여 터빈디스크의 bore 면에 도달하는 초음파의 영역을 계산하고 있으며, 이 경우 bore 면은 초음파탐촉자에서 원거리음장에 위치하고 있다. 계산을 행한 결과, 탐상각도는 약 1.5°로 현재의 계산된 결과가 상당히 실험과 일치함을 나타내고 있다.

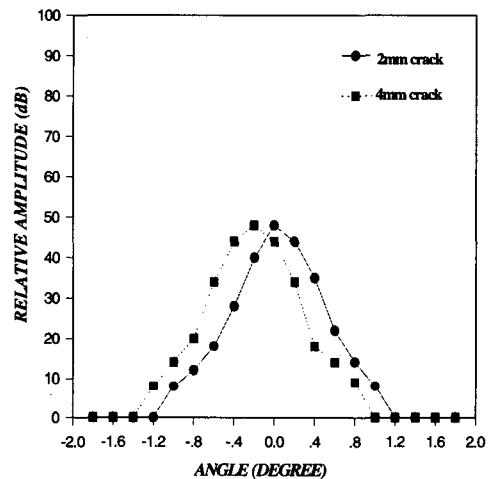


Fig. 4. Relative echo-amplitude from flaws vs. angle variations (5 MHz, 0.5 inch transducer)

5.3. 수직방향 주사시에 Keyway의 결함 탐지범위

Fig. 5에서는 5MHz 초음파탐촉자를 사용하여 수직방향 주사시에 keyway영역에서 초음파 탐상시 탐상범위를 나타내고 있다. 근/원거리 음장은 썸머를 통과하여 디스크에 도달한 접점을 기준으로 Snell's law에 따라 굴절한다고 가정하여 계산하였다. 이 결과는 program C, program D, program E 및 program F의 결과를 도식화시킨 것이고, 이를 이용하여 Table 1에서 초음파탐촉자의 직경과 설치 위치의 변화에 따른 초음파의 탐상범위를 나타낸 것이다. 앞에서 기술한 근/원거리 음장의 결과와 비교하면, keyway 영역의 초음파 탐상범위를 다음과 같이 간단히 요약할 수 있다.

① 직경 0.5 inch인 초음파탐촉자를 사용할 시에 keyway영역은 원거리음장이므로 디스크 내부 d=53mm에 초음파탐촉자를 위치시켰을 시에 약 26mm

의 탐상범위를 갖고, 디스크내부 $d=75\text{mm}$ 에 초음파 탐촉자를 위치시켰을 시는 약 30mm 의 초음파 탐상 범위를 갖는다.

② 직경이 1 inch인 초음파탐촉자를 사용할 시에 keyway 영역은 근거리음장이므로 디스크 내부 $d=53\text{mm}$ 에 초음파탐촉자를 위치시켰을 시에 약 13mm 의

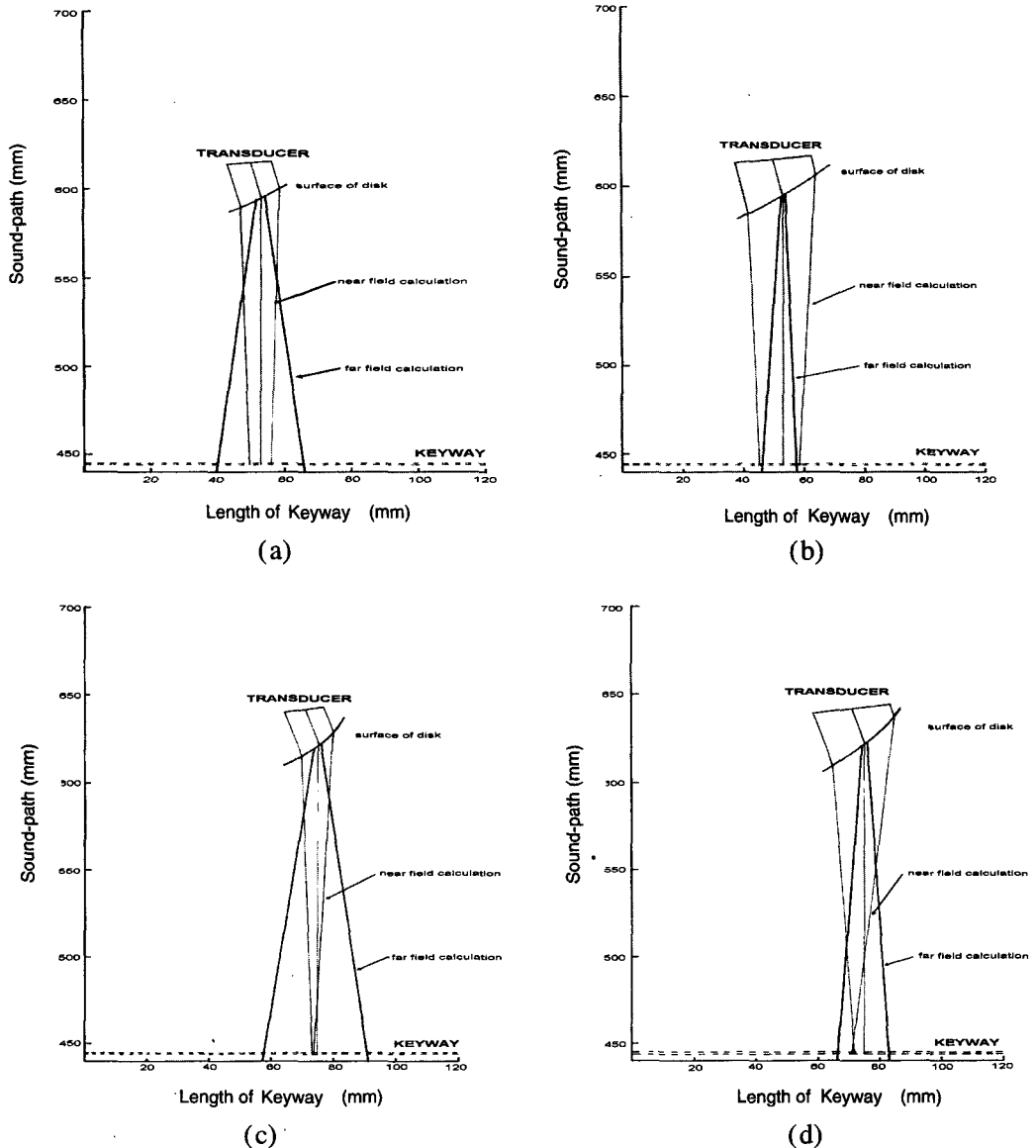


Fig. 5. Inspection region when performing radial scan with transducers of nominal frequency 5MHz and
 (a) the diameter 0.5 inch located at the distance of 53mm from the disc hub
 (b) the diameter 1 inch located at the distance of 53mm from the disc hub
 (c) the diameter 0.5 inch located at the distance of 75mm from the disc hub
 (d) the diameter 1 inch located at the distance of 75mm from the disc hub

탐상범위를 갖고, 디스크 내부 d=75mm에 초음파탐촉자를 위치시켰을 시는 약 1mm의 초음파 탐상범위를 갖는다.

그러므로, 수직방향 주사의 경우에 keyway영역의 결함을 탐상하기 위하여는 0.5inch 초음파탐촉자를 사용하는 것이 초음파의 탐상범위를 넓게 할 수 있다.

Table 1. Inspection region according to diameter and location of the transducer

Transducer		Near Field		Far Field	
Dia-meter (in.)	Loca-tion (mm)	Inspection Region (mm)	Inspection Length (mm)	Inspection Region (mm)	Inspection Length (mm)
0.5	53	46.6~56.0	9.4	40.0~65.7	25.7
1	53	45.5~58.2	12.7	46.6~59.5	12.9
0.5	75	74.0~74.4	0.4	58.2~88.0	29.8
1	75	70.9~71.8	0.9	66.7~83.0	16.3

5.4. 경사각 45° 주사와 90° 주사시에 결함 탐상범위

Fig. 6에서는 5MHz 초음파탐촉자를 사용하여 경사각 45°와 90° 주사시에 결함 탐상범위를 나타내고 있고 이를 이용하여 Table 2에서 초음파탐촉자의 직경과 설치위치의 변화에 따른 초음파탐상의 탐상범위를 나타내고 있다. 근/원거리 음장의 결과를 이용한다면 경사각 45°와 90° 주사시에는 대개 원거리 음장으로 취급이 가능하므로 Table 2에 주어진 초음파 탐상범위를 Fig. 5에 주어진 원거리 음장의 결과를 확대하여 분석한 결과이고, 다음과 같이 간단히 요약할 수 있다.

① 초음파탐촉자의 직경과 설치위치의 변화에 따른 초음파 탐상범위는 경사각 90° 주사가 전파거리가 크므로 항상 경사각 45° 주사보다 넓은 탐상범위를 갖는다.

② 경사각 45° 주사시는 초음파 탐상범위는 설치위치의 변화에 따른 변화는 거의 없고, 다만 초음파탐촉자의 직경이 클수록 탐상범위가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 0.5inch 초음파탐촉자일 경우에 약 30mm

이었고, 1inch 초음파탐촉자는 약 18mm이었다.

Table 2. Inspection region according to diameter and location of the transducer in tangential 45° scan and tangential 90° scan

Transducer		Tangential 45° Scan		Tangential 90° Scan	
Dia-meter (in.)	Loca-tion (mm)	Inspection Region (mm)	Inspection Length (mm)	Inspection Region (mm)	Inspection Length (mm)
0.5	53	37~68	31	21~84	63
1	53	41~59	18	37~64	27
0.5	75	54~94	40	36~108	72
1	75	65~84	19	56~94	38

6. 결론

터빈로타 디스크의 keyway 및 bore면에 발생한 결함을 탐지하기 위한 초음파탐촉자의 지향성 및 정확한 탐상범위를 결정하기 위한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 0.5inch 및 1inch의 직경을 갖는 5MHz 초음파탐촉자의 경우에 근/원거리 음장의 계산결과에서 근거리음장은 각각 63mm 및 253mm이었다.
- (2) 직경이 0.5inch이고 5MHz인 초음파탐촉자를 사용하여 bore면에 도달하는 초음파 탐상각도는 1.2° 이었고, 계산된 결과는 탐상각도가 1.5° 이었다. 이는 실험과 계산된 결과가 상당히 근접함을 알 수 있다.
- (3) 수직방향 주사시 직경이 0.5 inch 초음파탐촉자를 사용하였을 경우에 약 26mm의 keyway의 결함 탐상범위를 갖는다.
- (4) 경사각 45° 주사시는 초음파 탐상범위는 설치위치의 변화에 따른 변화는 거의 없고, 다만 초음파탐촉자의 직경이 클수록 탐상범위가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 0.5inch 초음파탐촉자일 경우에 약 30mm이었고, 1inch 초음파탐촉자는 약 18mm이었다.

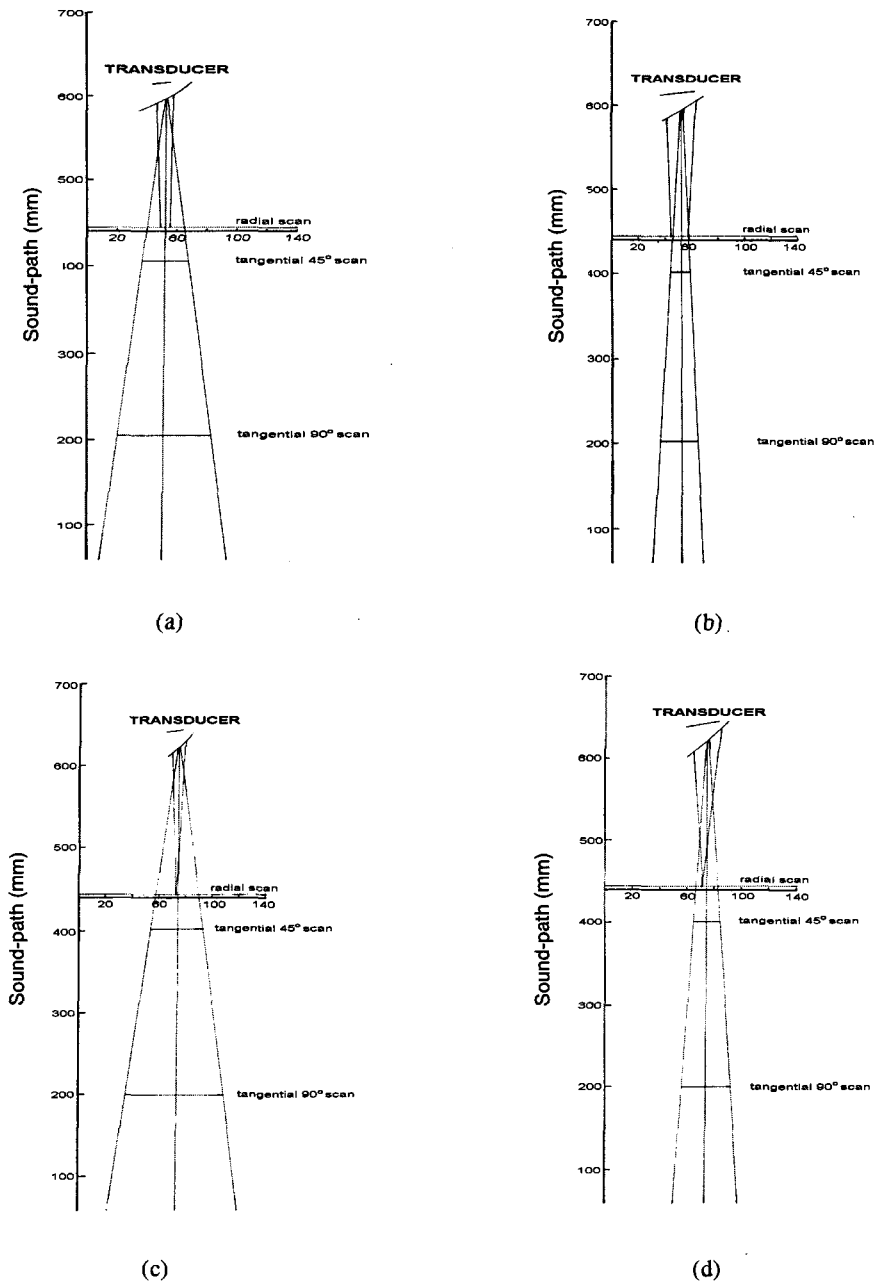


Fig. 6. Inspection region when performing radial scan, tangential 45° scan and tangential 90° scan with transducer of nominal frequency 5MHz and
 (a) the diameter 0.5 inch located at the distance of 53mm from the disc hub
 (b) the diameter 1 inch located at the distance of 53mm from the disc hub
 (c) the diameter 0.5 inch located at the distance of 75mm from the disc hub
 (d) the diameter 1 inch located at the distance of 75mm from the disc hub

참고 문헌

- 1) 장홍근 외, 초음파를 이용한 저압 터빈로타 디스크 검사 기술 개발, 비파괴검사학회지, Vol. 17, No. 3 (1997), pp. 174-183
- 2) 증기 터빈로타 기술관리에 관한 조사연구; 한전전력공사 기술연구소, 연구소보 14호 (1980)
- 3) F. F. Lyle, Jr. and H. C. Burghard, Jr., Steam Turbine Disc Cracking Experience, EPRI Report NP-2429, 2. Sec. 2., (1982)
- 4) G. P. Singh, R. A. Cervantes and R. L. Spinks, Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine Disc Rims, SWRI, pp. 1-16
- 5) K. H. Mayer, H. J. Meyer and W. Riess, Stresses in Rotors of Modern Steam Turbines Set Standards for Forgings, 2, 6 (1979)
- 6) K. H. Mayer, Critical Issues on the Necessity for Axial Boreholes in Rotor Forgings for Turbines and Generators, Workshop Proceedings: Rotor Forgings for Turbines and Generators, EPRI WS-79-235 (1981)
- 7) R. Fredenberg, B. Anderson, M. Salerno and R. Simpson, 영광원자력발전소 1,2호기 검사에 대한 보고서, Westinghouse Electric Corporation (1991)
- 8) Albert S. Birks, Robert E. Green, Jr., and Paul McIntire, Nondestructive Testing Handbook, ASNT, 7 (1991), pp. 197-198
- 9) Leszek Filipczynski, Zdzislaw Pawlowski and Jerzy Wehr, Ultrasonic Methods of Testing Materials, London, Butterworths (1966), pp. 19-25
- 10) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppers and James V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 3rd ed., John Wiley & Sons (1982), pp. 176-182
- 11) Josef Krautkrämer and Hebert Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 2nd ed., Springer-Verlag (1977), pp. 62-75

Evaluation of Near/Far Field and Directivity of Ultrasonic Transducer for Turbine Rotor Disc

S. H. Won*, H. K. Chang*, K. S. Cho*, J. O. Lee* and J. K. Lee**

* Nondestructive Testing & Evaluation Group

Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon 641-010

** Dept. of Physics, Pu Kyong National University, Pusan 608-737

Abstract Near/far field length and directivity of transducers were investigated for the improvement and evaluation of the detectability of flaws in a disc. The reference block is fabricated for the disc of stage 6 in Yonggwang unit 1. The near/far field and directivity of an ultrasonic transducer with the center frequency of 5MHz were calculated for the inspection of the disc. These values showed good agreements with the experimental results. In the system composed of a wedge and a disc, those are evaluated theoretically and experimentally for the specimen with the artificial flaws of the size 2mm and 4mm and an ultrasonic transducer with the center frequency 5MHz and diameter 0.5inch. The detectability of keyway-flaw and detectable region for inspection were evaluated by using both tangential 45° and 90° transducers located at the distance of 53mm and 75mm from the disc hub, respectively.