論 文

韓國非破壞檢査學會誌
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
第13號 Vol. 7, No. 2, (1988)

超音波回折方法을 이용한 龜裂의 높이 測定

李在沃*·李勝奎*·金永吉*

Measurement of the Crack Height using the Two-Probe Ultrasonic Diffraction Method.

Jae Ok Lee, Seung Kyu Lee *and* Young Kil Kim

Abstract The optimum test conditions of measuring the crack height were determined for the two-probe ultrasonic diffraction method. The applicability and the accuracy of the two-probe ultrasonic diffraction method on the inclined artificial cracks and the fatigue cracks were evaluated. It was possible to measure the height of the normal and inclined artificial cracks with the maximum error of ± 0.5mm with the two-probe ultrasonic diffraction method. It was found, however, that the accuracy of this method in measuring the height of the fatigue crack depends on the degree of closure of the crack tip. It was desirable to choose a refraction angle as small as possible, but the angle should not be so small that the distortion of the lateral waveform became appreciable.

1. 서 론

산업구조물이 대형화되고 고부하, 고압의 가혹한 상태에서 많이 사용됨으로서 산업 구조물의 안전관리기술이 주요과제로 등장하게 되었다. 안전관리기술의 중요성이 대두되면서 구조물내에 존재하는 균열형 평면결함의 존재 및 크기를 정량적으로 알아내는 비파괴시험 방법 개발의 필요성이 제기되어 왔다.

비파괴시험방법중 평면형결함의 높이를 정량적으로 측정하기에 가장 가능성있는 방법은 초음파시험방법이다. 초음파시험에 의한 평면형 결함의 높이를 측정하는 방법으로는 echo amplitude 이용방법, 탐촉자 이동거리방법, 주파수 스펙트럼 분석방법, 가시화방법 및 초음파전파시간 이용방법 등이 있다.[1] 이들 방법중 산업현장에서 널리 적용되고 있는 방법으로는 echo amplitudo 및 탐촉자 이동거리를 이용하는 방법이 있다. 그러나 이들 방법은 피검사체의 표면상태와 결함면의 거칠기 및 결함의 경사정도에 따라 반사신호크기가 변화되며 대상체와 탐촉자의 접촉상태에 따라서도 반사신호의 크기가 변화되므로 결함의 높이를 보다 정량적으로 사정하기에는 미흡한 방법이다.

이와같은 근본적인 문제점 해결을 위한 방법으로 제안된 대표적인 방법이 초음파 전파시간을 이용하는 초음파회절 방법이다. 그러나 초음파회절 방법은 송수신되는 초음파의 종류와 굴절각에 따라 적용방식이 다양하여[2] 대상체에 적합한 적용방식 선정에 많은 어려움이 있다.

지금까지 연구보고된 대표적인 적용방식으로는 Golan[3]의 굴절각 45° 횡파횡파방식, silk[4]와 Date등[5]의 굴절각 60°종파종파방식, Mackiewcz등[6]의 굴절각 62°종파종파방식, Curtis등[7]의 굴절각 65°종파종파방식, Golan[8]의 굴절각 71°종파종파방식 등이 있다. 이와같이 주장하는 방식이 서로 다르기 때문에 이들 연구결과를 통하여 적합한 적용방식을 선정하기는 어

*韓國標準研究所 非破壞試驗研究室
接受 : 1988年 1月 30日

려운 실정이다. 또한 이들 연구에서는 주로 slit 형 수직 인공결함을 대상으로 조사하였기 때문에 실제 구조물에서 발생되는 균열류 결함 및 경사결함에 대한 초음파회절방법의 적용성 및 높이 측정의 정확도에 관한 체계적인 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 적합한 적용방식의 선정기준과 피로균열 결함을 대상으로한 결함높이 측정의 정확도를 조사하였다. 또한 경사결함에 대한 초음파회절방법의 적용성 조사를 위해 높이측정의 정확도를 조사하였다.

2. 실 험

2.1. 시험편 및 실험장치

실험용 시험편의 재질은 원유저장탱크 소재로 사용되는 용접구조용 압연강재 SWS 58QT이다. 시험편의 치수와 제작된 결함의 종류 및 형태는 Fig. 1과 같다. Slit형 수직결함의 높이는 2.1, 5.2, 6.8, 9.9, 12.5, 13.0 및 14.9㎜이며 Slit형 경사결함은 시험편의 표면에 대하여 경사도가 45°로써 결함의 수직높이는 4.8, 8.6 및 10.7㎜이다. 피로균열결함은 측면에서의 결함높이가 1, 3, 5, 7 및 10㎜ 정도가 되도록 제작하였다.

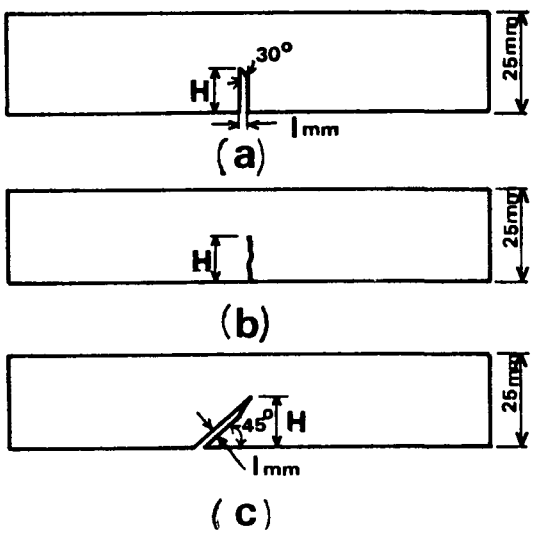


Fig. 1. Dimensions and Shape of test blocks.
a) Normal slit b) Fatigue crack
c) Inclined slit

Fig. 2는 제작된 시편의 결함높이 측정을 위해 사용된 장치의 개략도이다. 장치는 초음파 발생 및 수신을 위한 Panametrics 5052 Ultrasonic Analyzer, 파형관측 및 전파시간측정을 위한 H.P.1743A △ time Oscilloscope 와 KB-Aerotech 5MHz-0.5″의 탐촉자로 구성되어 있다. 본 실험을 위해 45°굴절각의 횡파,61° 굴절각의 종파와 69°굴절각의 종파용 탐촉자 Shoe를 제작하였다.

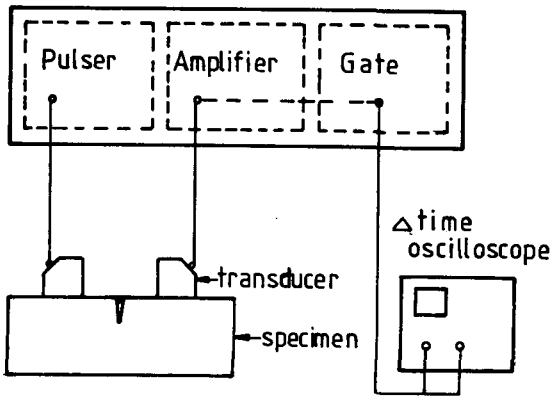


Fig. 2. Schematic diagram for ultrasonic flaw detection and time measurement system.

2.2. 결함높이 측정방법

초음파 회절방법을 이용한 평면형 결함의 높이 측정방법은 결함의 위치, 사용되는 파의 종류(mode) 및 굴절각에 따라 다르다. 45° 횡파횡파방식의 경우 Fig. 3과 같이 두 탐촉자간의 간격을 시편저면 신호가 최대로 되게 조정하여 송신탐촉자에서 수신탐촉자에 도달되는 초음파 전파시간 t_B를 측정한 다음 탐촉자를 재조정하여 결함의 선단부에서의 회절파신호가 최대크기가 될때 송신탐촉자에서 수신탐촉자에 도달되는 초음파 전파시간 t_D를 측정한다. 이때 t_B와 t_D의 시간차를 이용하여 결함의 높이를 측정한다. 결함이 탐촉자 주사면에 있는 표면결함(이하 전면결함)일때는 식(1-a), 주사면 반대면에 있는 표면결함(이하 저면결함)일때는 식(1-b)로부터

$$H = T - \frac{V_S \ \mathrm{Cos}\ \alpha}{2}(t_B - t_D) \qquad (1-a)$$

$$H = \frac{V_S \ \mathrm{Cos}\ \alpha}{2}(t_B - t_D) \qquad (1-b)$$

결함높이를 측정한다. 여기서 H는 결함높이, T는 시편두께, V_s는 매질내의 횡파속도, α는 탐촉자의 횡파굴절각이다.

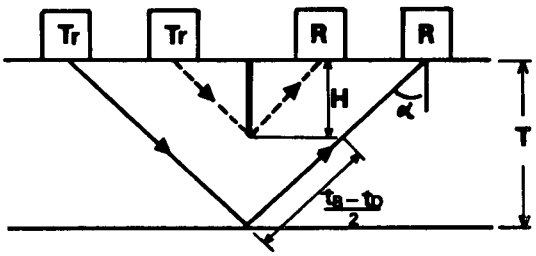


Fig. 3. Schematic diagram for the measurement of crack height, H, with 45° shear-shear mode.

61° 종파종파방식과 69° 종파종파방식에서는 Fig. 4와 같이 탐촉자를 나란히 배열하고 송신탐촉자에서 시편의 표면부를 따라 수신탐촉자에 직접 도달되는 lateral wave의 전파시간 t_L 과 결함의 선단부에서 회절되어 수신탐촉자에 도달된 전파시간 t_D를 측정한다. t_L과 t_D의 시간차를 이용하여 저면결함일때는 식 (2-a), 전면결함일때는 식 (2-b)로 부터 측정한다.

$$H = T - [(S + \frac{t_D - t_L}{2} V_c)^2 - S^2] \quad (2-a)$$

$$H = [(S + \frac{t_D - t_L}{2} V_c)^2 - S^2] \quad (2-b)$$

여기서 H는 결함높이, T는 시험편두께, S는 탐촉자간의 1/2거리, V_c는 매질내의 종파속도이다.

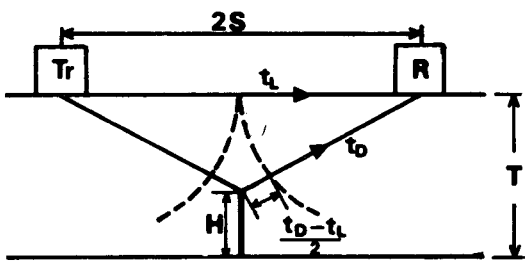


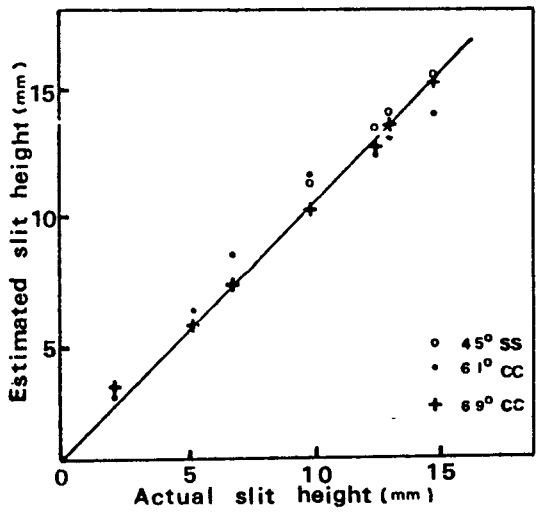
Fig. 4. Schematic diagram for the measurement of crack height, H, with 61° and 69° longitudinal-longitudinal mode.

3. 실험결과 및 고찰

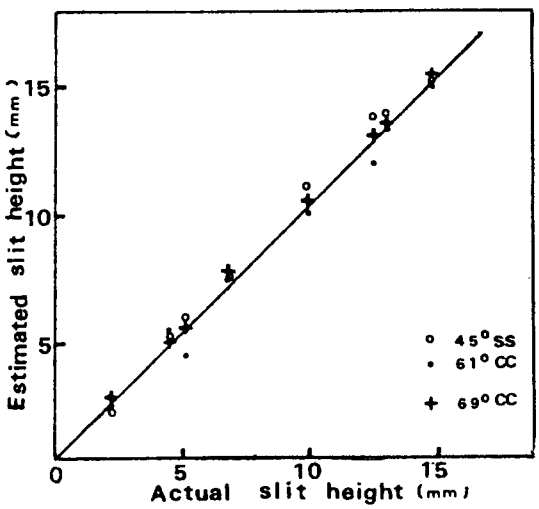
3.1. 수직인공결함에서 적용방식에 따른 결함높이 사정

Fig. 5는 45° 횡파횡파, 61° 종파종파와 69° 종파종파방식의 초음파회절 방법으로 높이가 각각 다른 Slit형 인공결함을 대상으로 하여 결함높이를 측정한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 1(a)의 저면결함의 경우와 Fig. 1(b)의 전면결함의 경우에서와 같이 결함높이 측정을 위해 적용된 초음파회절방법은 적용방식에 따라 결함측정의



a) back surface normal slit



b) front surface normal slit

Fig. 5. Estimation accuracy of normal slit height made by various array modes.

Table 1. Estimation of normal slit height made by various array modes for

Array mode	Refracted angle (degree)	Range of slit height (mm)	Max. error (mm)	Mean error (mm)
SS	45	2.1−14.8	0.8	0.4
CC	61	2.1−14.8	1.1	0.4
CC	69	2.1−14.8	0.4	0.2

a) back surface normal slit

Array mode	Refracted angle (degree)	Range of slit height (mm)	Max. error (mm)	Mean error (mm)
SS	45	9.9−14.8	0.6	0.5
CC	61	2.1−14.8	1.5	0.8
CC	69	2.1−14.8	0.5	0.2

b) front surface normal slit

정확은 다소 차이가 있으나 결함높이의 정량적인 측정이 가능함을 알 수 있다. Fig. 5의 결과로 부터 적용방식에 따른 높이측정의 최대오차와 적용가능한 결함높이의 범위를 정리하면 Table 1과 같다. Table 1에서 나타난 바와 같이 저면과 전면결함에서 가장 높은 정확도로 결함높이 측정이 가능한 방식은 69°종파종파방식이다. 45° 횡파횡파방식의 경우도 비교적 높은 정확도로 결함높이 측정이 가능하나 전면결함에서 측정가능한 결함높이가 비교적 큰 9.9 — 14.8mm 높이를 가진 시편에서만 가능하였다.

69° 종파종파방식이 61° 종파종파 방식보다 측정의 정확도가 높은 본 연구결과는 60° 종파종파방식이 70° 종파종파방식보다 정확도가 높다는 Date et al[5] 의 연구결과와 상반된다.

이같이 상반된 연구결과를 규명하고 적합한 종파의 굴절각 선정을 위하여 높이측정의 정확도에 영향을 주는 오차발생요인을 조사하였다. 본 연구에서의 측정오차 요인으로는 시간측정장치의 분해능 및 정확도에 의한 계기오차, 근사식 사용으로 생기는 이론오차와 관찰대상신호의 파형형태로 인해 발생되는 오차가 있다.

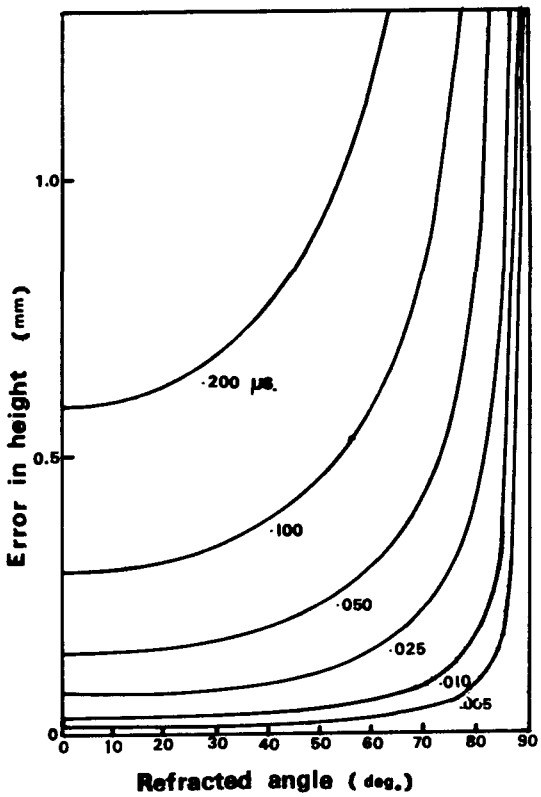


Fig. 6. Estimated error of the slit height as a function of the diffracted angle for various time measurement error.

Fig. 6은 전파시간 측정오차와 굴절각 크기에 따른 결함높이 측정오차크기를 나타낸 도표이다. 본 연구에서 사용된 기기의 계기오차는 10 nsec로써 Fig. 6에서 69° 굴절각의 높이 측정오차를 구해보면 0.06mm, 0.08mm이다. 또한 근사식 사용으로 인한 이론오차의 경우, 69° 종파종파방식에서 높이측정의 평균값이 0.2mm인 점을 고려할때 이론오차로 인한 높이 측정오차의 최대크기는 0.2mm 이상의 값이 될 수 없다.

Fig. 7은 14.8mm 높이의 저면수직 인공결함에서 61°와 69° 종파종파방식의 signal trace를 각각 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)의 61° 종파종파방식의 lateral wave 신호는 Fig. 7 (b)의 69° 종파종파방식의 lateral wave 신호파형과는 달리 정상파형태가 아님을 알 수 있다. 전파시간측정시 61° 방식의 lateral wave 신호와 같은 파형형태로 인해 발생될 수 있는 오차는 $\lambda/2-\lambda$ (λ : 파장)

정도로써 100nsec—200nsec 정도이다.

Fig. 6으로부터 오차가 100nesc와 200nsec 일때 61°에서의 높이 측정오차는 0.6mm와 1.25mm이다. 파형형태로 인해 발생되는 측정오차크기는 61°의 최대오차 1.5mm에 영향을 크게 미칠 수 있는 값이다.

이상의 결과를 종합해 보면 Fig. 6에서 보는 바와 같이 일반적으로 종파의 굴절각이 클수록 측정오차의 크기는 커지나 본 연구결과에서 61° 종파종파방식이 69° 종파종파방식보다 높이 측정의 정확도가 낮은 이유는 61°가 69°보다 lateral wave신호의 파형으로 인한 오차가 크기 때문이다. 적합한 종파의 굴절각은 lateral wave 신호의 파형으로 인한 오차가 미미한 굴절각 범위에서의 최소굴절각을 선정하여야 한다.

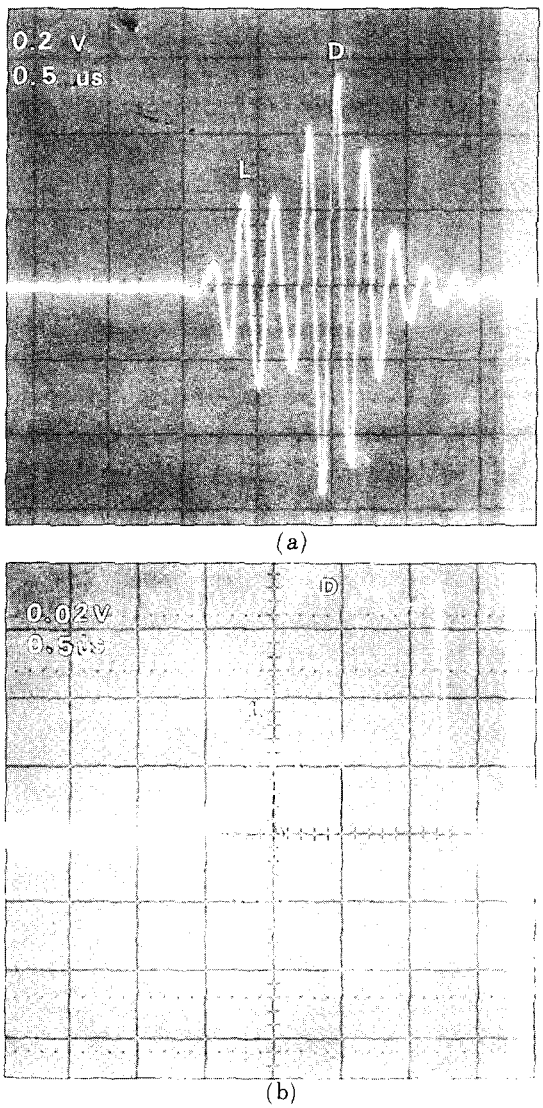


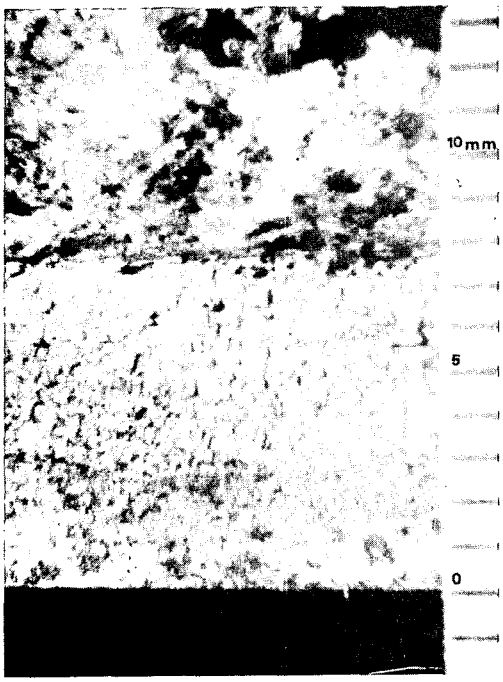
Fig. 7. Typical A-scan RF signals obtaind in (a) 61° and (b) 69° longitudinal-longitudinal mode.

3.2. 피로균열 결함에서의 결함높이 측정

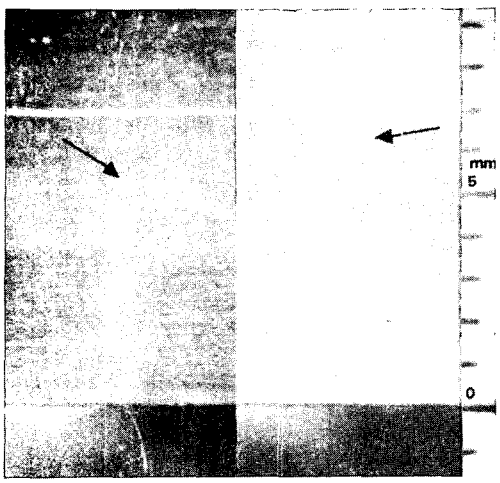
Fig. 8은 7.5mm 피로균열시편의 파단면과 파단전의 양측면에서의 결함의 높이를 나타낸 것으로써 Fig. 8 (a)의 시편 중앙부에서와 Fig. 8 (b)의 양 측면에서의 결함높이가 각각 다름을 알 수 있다. 따라서 피로균열결함의 실제높이는 시편파단 후 회절방법에 의해 높이가 측정될때의 탐촉자 위치에서 각각 측정되었다.

Table 2는 피로균열결함을 대상으로 하여 69° 종파종파방식으로 결함높이를 측정한 결과이다. 피로균열높이 측정의 최대오차는 1.9mm로서 인공수직결함의 0.5mm보다 측정의 정확도가 떨어진다. 이는 Table 2에서 보는바와 같이 비교적 결함높이가 큰 7.5mm와 11.0mm 피로균열결함의 시편에서 측정오차가 크다. 이들 시편에서 오차요인을 조사하기 위해 7.5mm와 11.0mm 결함높이의 시편을 3점 굽힘시험으로 일정한 하중을 주어 균열 선단을 열어놓고 회절방법으로 결함높이를 측정하였다. 높이 측정결과, 7.5mm 균열결함에서 저면 및 전면결함은 각각 7.9mm, 7.4mm였으며 11.0mm 균열결함에서는 저면 및 전면결함이 11.1mm, 10.8mm이었다. 균열선단의 열림상태에서 결함높이 측정시 최대오차는 0.4mm이다.

이상의 결과를 종합해 보면 피로균열 결함경우 균열선단의 닫힘현상으로 인해 11.0mm 피로균열에서 1.9mm의 최대오차가 발생되었으나 피로균열결함의 높이가 낮을수록 측정의 정확도는 높았고 균열선단의 열림상태에서 인공결함과 같은 높은 정확도로 결함높이 측정이 가능하였다. 이는 전파시간을 이용하는 두 탐촉자 방식의 초음파회절 방법은 실제 균열류 결함에서도 높은 정확도로 높이 측정이 가능함을 나타내 준 것이다.



a) Cross section of the central part of the specimen. The crack propagated about 7.5mm from the bottom surface.



b) Crack height observed at both sides of the specimen. Arrows indicate the tip of the fatigue crack.

Fig. 8. Views of a fatigue crack observed at the different sites of the specimen.

Table 2. The fatigue crack height estimated by 69° longitudinal-longitudinal mode.

Actual height (mm)	Crack location	Estimated height (mm)	Error (mm)
1.0	back	1.3	0.3
	front	1.3	0.3
3.3	back	3.4	0.1
	front	3.2	0.1
5.2	back	5.4	0.2
	front	5.1	0.1
7.5	back	7.0	0.5
	front	6.7	0.8
11.0	back	9.7	1.3
	front	9.1	1.9

3.3. 경사인공결함에서의 결함높이사정

Table 3은 45° 경사인공결함을 대상으로 하여 69° 종파종파방식으로 결함높이를 측정한 결과이다. 경사결함의 높이 측정시 최대오차는 0.5mm로써 수직 인공결함의 정확도와 같다.

이같은 결과는 전파시간을 이용하는 두 탐촉자방식의 초음파회절방법이 수직결함 뿐만 아니라 경사결함에서도 적용가능하며 높은 정확도로 높이 측정이 가능한 것을 나타내 준 것이다.

Table 3. The inclined slit height estimated by 69° longitudinal-longitudinal mode.

Actual height (mm)	Crack location	Estimated height (mm)	Error (mm)
4.8	back	5.3	0.5
	front	4.4	0.4
8.6	back	8.7	0.1
	front	8.1	0.5
10.7	back	10.9	0.2
	front	10.7	0.0

4. 결 론

이상과 같은 실험결과와 고찰을 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 전파시간측정을 이용하는 두 탐촉자 방

식의 초음파회절방법은 피로균열결함이나 경사결함에서도 결함높이를 높은 정확도로 측정할 수 있다.

2) 종파종파방식에서는 굴절각이 작을수록 높이측정의 정확도는 높아지나 lateral wave파형으로 인한 오차가 크므로 굴절각은 lateral wave 파형이 distortion 되지 않는 최소 굴절각으로 선정하는 것이 적합하다.

3) 적용된 방식중에서 높이 측정의 정확도가 가장 높은 69° 종파종파방식의 경우 수직뿐만 아니라 경사 인공결함에서 최대오차가 0.5 mm 이었으며 피로균열결함의 경우 균열선단의 열림상태에서나 높이가 낮은 피로균열에서는 인공결함과 같은 높은 정확도로 높이 측정이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. 이재옥 : "초음파를 이용한 평면형 결함높이 사정," 측정표준, 제 9권 3호, pp. 36-42, 1986.
2. W. Sachse and S. Golan, "The Scattering of Elastic Pulses and the Nondestructive Evaluation of Materials," Elastic Waves and Nondestructive Testing of Materials, AMD-Vol. 29, pp. 11-29, 1978.
3. S. Golan, "Defect Characterization and Dimensioning of Cracks in Welds by the Ultrasonic Diffraction Method," NBSIR 80-1983, 1980.
4. M. G. Silk, "Transfer of Ultrasonic energy in the Diffraction Technique for Crack Sizing," Ultrasonics, Vol. 17, No.3, pp. 113, 1979.
5. K. Date, H. Shimada and N. Ikenage, "Crack Height Measurement an Evaluation of the Accuracy of Ultrasonic Timing Method," NDT International, Dec., pp. 315-319, 1982.
6. Mackiewica S., Gorzny J., Kiersnowski M., Pawlowski Z., "Ultrasonic Detection and Depth Measurements of Cracks in Thick Welds," Proc. of 11th world conference on NDT, pp. 1124-1129, 1985.
7. G. J. Curtis and B. M. Hawker, "Automated Time of Flight Studies of the Defect Detection Trial Plate 1 and 2", British Journal of NDT, Sept., pp. 240-248, 1983.
8. S. Golan, "Optimization of the Crack Tip Ultrasonic Diffraction Technique for Sizing of Crack," Materials Evaluation, Vol. 39, pp. 166-168, 1981.