超音波의 Tip Diffraction 方法을 이용한 缺陷連續監視를 위한 크기 評價

鄭炫圭 趙鍾吉 金炳喆

韓國에너지研究所 非破壞試驗室

〈1987년 7월 3일 접수〉

A Size Evaluation for Continuous Flaw Monitoring Using the Tip Diffraction Method

H. K. Jung, C. K. Cho, B. C. Kim

Abstract

Most of significant defects in the pressure boundaries of nuclear power plant were dispositioned to be monitored periodically every inservice inspection. Due to the difficulty of the defect sizing during operation, it is necessary to develope the continuous flaw monitoring techniques. The Tip Diffraction method, specifically speaking, spot seems to be suitable for flaw monitoring. The optimum conditions of selecting the transducer were 3.5 MHz and 45-57 degree according to compatibility with the defect height. The effective calculation of the defect height was to assume the fact that the incident beam is parallel. This method would be supplemented to ASME method about the defect characterization for the surface flaw.

1. 서 론

1987년 6월 원자력발전소 8호기가 상업가동함으로써 우리나라 전체 발전량의 50%이상을 원자력발전이 차지하고 있어 명실공히 원자력발전 보유국이 되었다.

원전의 안전성 문제는 무엇보다도 중요하며 비파괴검사는 주요부품의 결함탐지 및 크기측정을 수행함으로써 그의 일익을 담당하고 있다. 현재 원자력분야에 널리 사용되고 있는 ASME 코드 내용에서는 초음파 진폭을 기준으로 한 결함크기평가 이기 때문에 여러가지 요소들에 의해 정밀성 및 재현성에 있어서 한계점이 있다. 예를 들면 결함크기, 기울기, 표면거칠기 및 접촉상태 불균일 등이다. 더욱이 현재 통용되고 있는 진폭기준 측정방법은 결함크기가 초음파 빔 직경보다 작은 경우 과대평가하는 반면에 역의 경우 결함크기를 과소평가하는 경향이 있어 검사 결과의 신뢰성에 상당한 문제점으로 되어 있다. 이에 따라 구조물의 건전성 평가에 정확한 자료를 제시할 수 있는 초음파 검사기술 개발의 필요에 의해 상당한 연구가 진행되고 있다. (1, 5, 6, 11)

결함 특성에 관한 정량적 정보를 제공하는 초음파 신호분석 방법을 크게 세가지로 분류할 수 있는데 첫째는 주파수 분석에 의한 신호해석방법, 둘째는 초음파 신호의 도달시간을 분석하는 방법, 셋째는 ASME 방법과 같은 초음파 최대 진폭을 분석하는 방법 등이다. 본 실험의 목적인 결함연속감시에 적합한 검사기술은 초음파 전달시간에 의한 평가방법이 적당하였고 구체적인 측정방법은 Tip Diffraction현상을 이용한 SPOT(Satellite Pulse Observation Technique) 방법을 사용하였다. TIP DIFFRACTION 방법의 특징으로는 다음과 같은 성질이 있다.(2, 10)

1) 신호진폭에 의한 평가가 아니고 초음파 전달시간에 의한 평가이기 때문에 탐촉자 특성이 검사자에 덜 의존적이다.

2) 균열 높이측정이 간단하다.

3) 수동 초음파탐상시 사용한 탐촉자를 그대로 사용 가능하다.

4) 다양한 수직형 결함에 적용 가능하다.

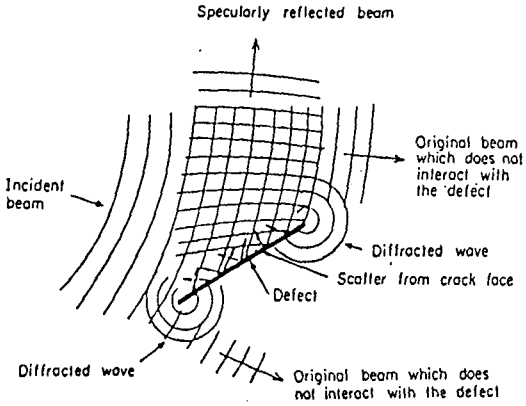


Fig. 1 Stylized representation of the interaction of an ultrasonic wave with a crack-like defect.

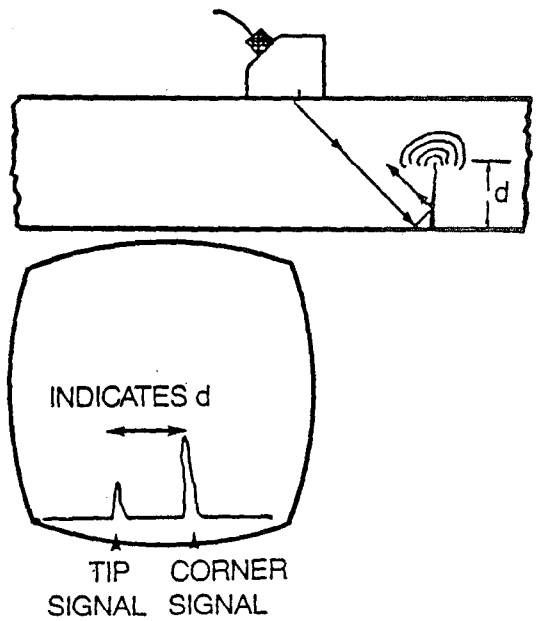


Fig. 2 Principle of the Tip diffraction method.

선단회절 현상은 입사된 초음파가 균열성 결함과 부닥칠 때 Fig. 1과 같이 나타나고 Tip diffraction 방법은 이 회절파를 이용하여 Fig. 2처럼 측정할 수 있다.(3.4)

2. 실험장치 및 방법

2-1 시험편과 실험장치 구성

시험편 재료는 원자력발전소의 압력용기용 재료로 많이 사용되고 있는 SA 533B와 기계적성질과 화학적 조성이 비슷한 SCM-4 강을 이용하여 본 실험을 수행하였다. SCM-4 강의 화학성분은 Table.1에 나타내었다. 시험편 가공은 Notch 상태의 인공결함으로 여러가지 크기로서 표면결함을 밀링 가공하였다. Fig. 3은 시편 Block 도면이다. 기본 초음파 측정장비로는 KRAUTKRAMER USK-7을 사용 하였고, 정밀 시간차를 측정하기 위해서는 TEKTRONIX 2465 A CT형 Oscilloscope의 Cursor 기능을 적용하여 Fig. 4와 같이 실험장치를 구성하였다. 탐촉자는 일정크기(13mm×13mm)로서 빔 각도 변화는 35°, 45°, 60°이고 주파수 변화는 2.25MHz, 3.5MHz, 5.0 MHz을 사용하였다. 특히 최적 빔각도를 결정하기 위해서 가변각탐촉자(동경계기제, 2.25 MHz, 13mm×25mm)을 추가 사용하여 특정 위치에서의 최적조건을 조사하였다.

Table. 1 Chemical composition of SCM-4 steel.

(wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	others	Fe
0.41	0.22	0.75	0.02	0.02	1.1	0.2	Trace	Remainder

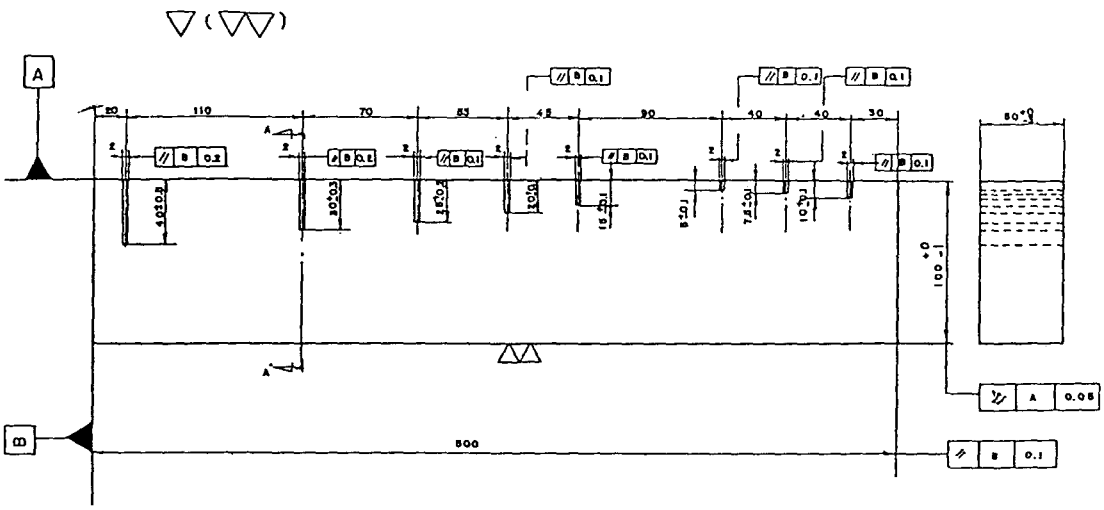


Fig. 3 Drawing of test block.

2-2 실험방법

Fig. 3의 시험편에다 USK-7 초음파탐상기를 사용하여 빔 노정거리차와 절대 정거리를 측정하여 결함높이를 계산하였고, 측정 정밀도를 향상시키기 위해 Ultrasonic Transducer Analyser(UTA-3)을 이용하여 Cursor 기능이 내장된 최신 Oscilloscope로서 시간차를 측정함으로써 결함높이를 계산하였다. 구해진 실험 데이타는 통계적방법을 통해 여러가지 변수를 도입하여 측정평가가 정량화 되도록 하였다. 그 내용으로는 Li-

near regression, Correlation coefficient, 평균편차, 표준편차, 및 Critical miscall(엉뚱한 값) 등이다.

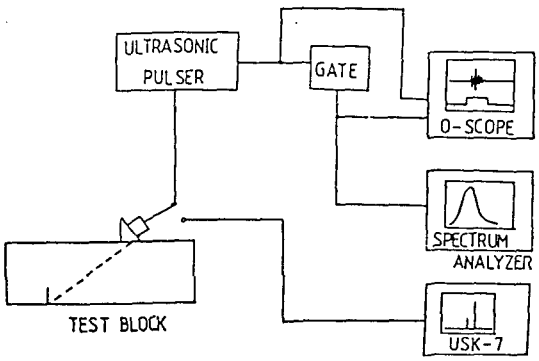


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system.

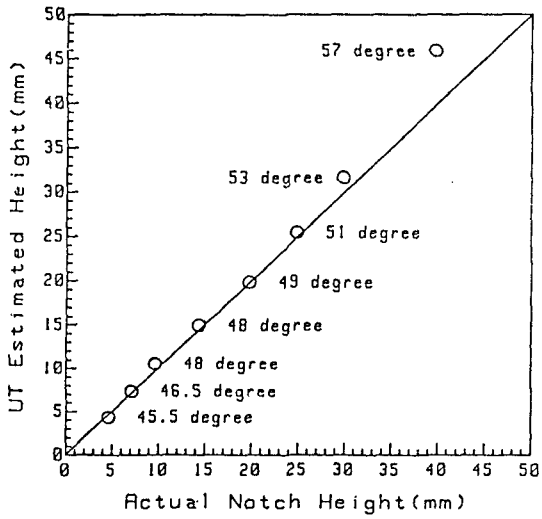
3. 실험결과 및 고찰

3－1 Tip diffraction방법의 최적조건

균열선단에서 발생되는 회절파는 노치코너 에서 반사되어오는 신호보다 훨씬 감도가 낮기 때문에 선명한 시간차를 읽을 수 있는 적정 입사각과 주파수를 결정하는 것이 필요하다.

최적 입사각은 Fig. 5에 나타난 대로 일정주사위치에서의 결함높이 변화에 따른 최상감도 각도를 가변각탐촉자로서 결정하였다. 또한 일정주사위치 조건 대신에 특정 입사각(35도, 45도, 60도) 으로 주사위치를 이동시킴으로써 균열선단 회절파의 최대감도를 얻을 수 있는 조건에서 결함크기 측정한 결과도 Fig. 6에 나타내었고 이 경우 최적 입사각은 45도 이었다. 이때 유의해야 할 점은 노치결함의 유효입사각이 33. 2도 부터 56. 8도까지이기 때문에 이 범위를 벗어난 각도에서는 파형변환에 의해 여러 파형의 신호가 나타나 신호해석상의 어려움이 있다.

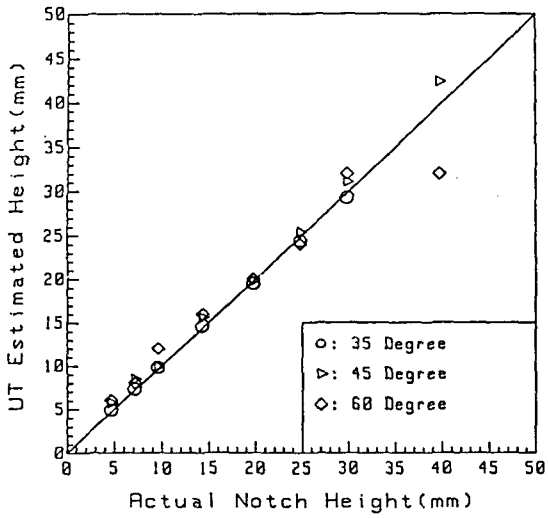
최적 검사방법은 Fig. 7의 경우 일정 탐촉자를 사용하여 주사위치를 이동시켰고 또한 탐촉자에 w-edge 각도로서 종파 및 횡파를 발생시키거나 송수신 형태로 측정한 결과, 종파나 송수신형태의 방법이 감도면에서 우수하였으나 결함크기 측정 정밀성은 횡파를 이용한 방법이 가장 좋았다. 실제 적용면을 고려하면 편리성이나 효율성 측면에서 횡파방법이 효과적이라 생각된다.



$h = \Delta MP / \cos\theta$

Statistical Parameters		Shear Pulse-Echo Method
Linear Regression Y=AX+B	A	1.1415
	B	-1.4403
Correlation Coefficient	R	.9961
Mean of Deviation	D	1.2875
Critical Miscall		0

Fig. 5 Accuracy of estimates of notch height for optimum incident beam angle using the variable transducer (2.25 MHz, 13 mm ×25 mm).



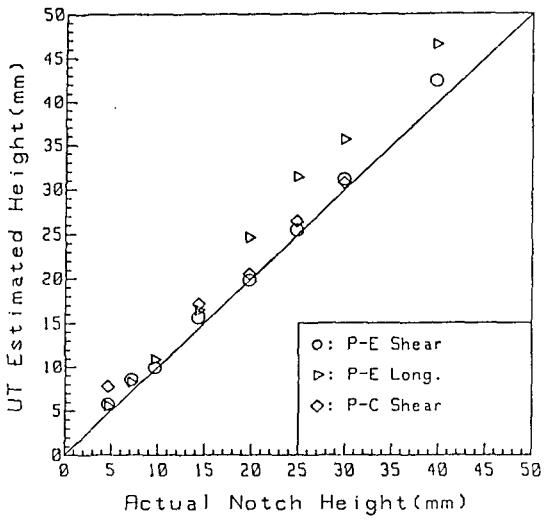
$h = \Delta MP / \cos\theta$

Statistical Parameters		35 Degree	45 Degree	60 Degree
Linear Regression Y=AX+B	A	.9669	1.0352	.8076
	B	.4498	.3905	3.608
Correlation Coefficient	R	.9999	.9985	.9738
Mean of Deviation	D	.2714	1.85	2.125
Critical Miscall		1	0	0

Fig. 6 Accuracy of estimates of notch height made by three different angles (35, 45, 60 deg) using 3.5 MHz 0.5″×0.5″ transducer.

최적 주파수는 다양한 주파수에 대해 실험하지 못했고 상용으로 많이 사용되는 2.25 MHz, 3.5MHz, 5.0 MHz을 이용한 결함크기 평가 결과는 Fig 8에 나타내었다. 이때 검토한 사항은 탐촉자가 지닌 파형(Wave form)과 주파수 분석(Spectrum analysis)을 조사하여 감도와 분해능을 판단한 결과, 감도는 3.5MHz가 가장 좋고 분해능은 주파수 대역이 가장 넓은 5.0MHz가 우수한 것으로 나타났고 직접 노치를 측정한 결과는 3.5 MHz의 결함 크기 평가가 가장 좋았다.

이상과 같이 Tip diffraction 방법의 최적조건 실험내용을 Table. 2에 요약정리 하였다.



Pulse Echo(P-E) Mode: $h = \Delta MP / \cos\theta$

Pitch Catch(P-C) Mode:

$$h = T - [(MP/2)^2 - (S/2)^2]^{1/2}$$

Statistical Parameters		P-E Shear	P-E Long.	P-C Shear
Linear Regression Y=AX+B	A	1.0352	1.2	.9125
	B	.3905	-.11	3.3988
Correlation Coefficient	R	.9985	.9977	.9984
Mean of Deviation	D	1.05	3.638	1.76
Critical Miscall		0	0	0

Fig. 7 Accuracy of estimates of notch height made by various tip diffraction techniques using 45 deg., 3.5 MHz transducer.

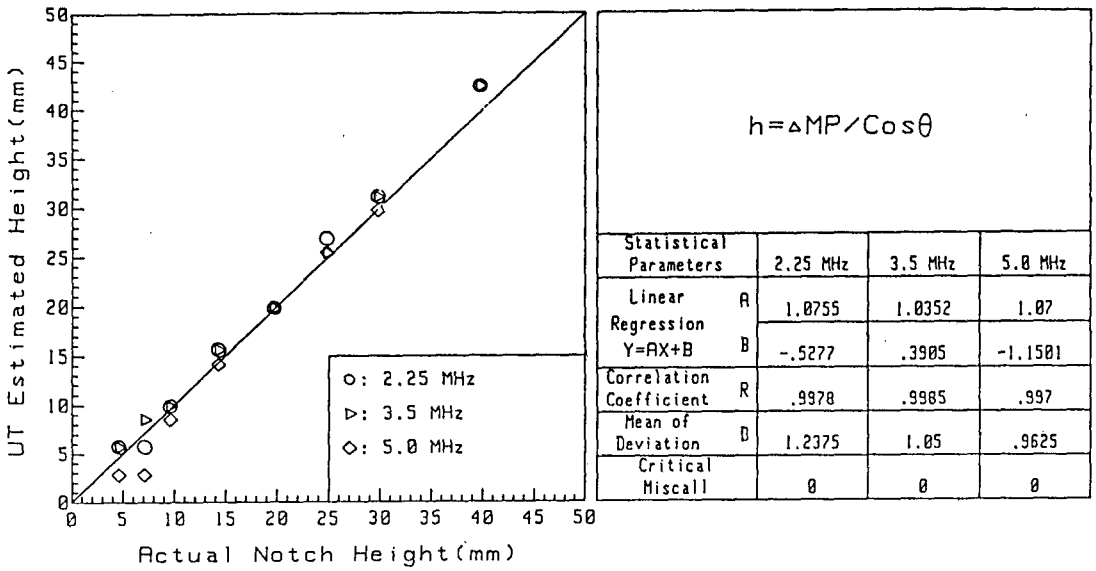


Fig. 8 Accuracy of estimates of notch height for optium frequency using 45 deg., 0.5″×0.5″ transducer.

Table. 2 Summary of test results.

METHODS	FREQUENCY (MHz)	ANGLE (DEGREE)	RANGE OF NOTCH (mm)	STANDARD DEVIATION (mm)	REMARKS
1. Tip diffraction					
○ Shear wave	2.25 MHz	35°-60°	5-40	1.38	Variable Angle TR.
	3.5 MHz	35°, 45°, 60°	5-40	1.12	SD(45°)
	5.0 MHz	35°, 45°, 60°	5-40	1.03	SD(45°)
○ Long wave	3.5 MHz	45°	5-40	3.89	
○ DUAL PROBES	3.5 MHz	45°	5-40	1.97	Good sensitivity of Tip diffraction
2. ASME(6dB drop)	3.5 MHz	45°	5-40	N/A	Surface flaw

3-2 결함높이 계산방법의 검토

초음파 장비를 이용한 결함높이 계산방법은 기본 원리는 같으나 측정에 필요한 세부적인 해독값은 대개 세가지로 분류할 수 있다. 즉, 빔 행정거리 차 (Metal path difference), 노치코너와 선단까지의 빔 행정거리, 및 매질내의 횡파 속도와 시간 차를 해독하는 것 등을 들 수 있다. 결함높이 측정은 Fig. 9에 나타난대로 입사빔이 노치에 대해 평행하게 주사된다고 가정하여 장비 CRT에 나타난 빔 행정거리 차를 측정하여 계산할 수 있다. 이때 사용한 계산식은 식(1)로 표시된다.

$$h = \Delta MP / \cos\theta \quad \cdots\cdots(1)$$

한편 초음파 빔이 탐촉자 wedge 입사점을 촛점

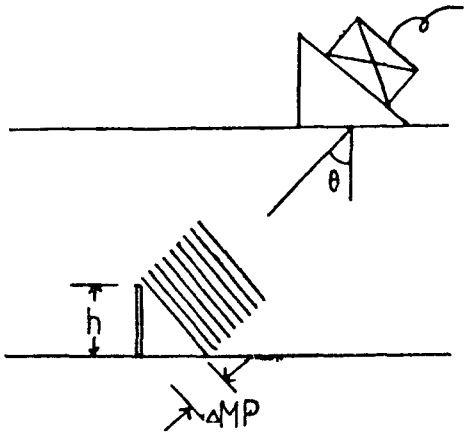


Fig. 9 Defect height calculation with the assumption of the parallel incident beam.

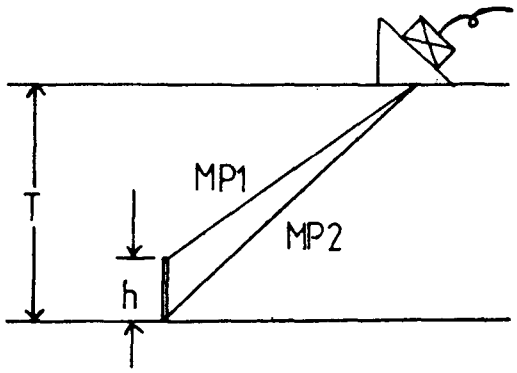


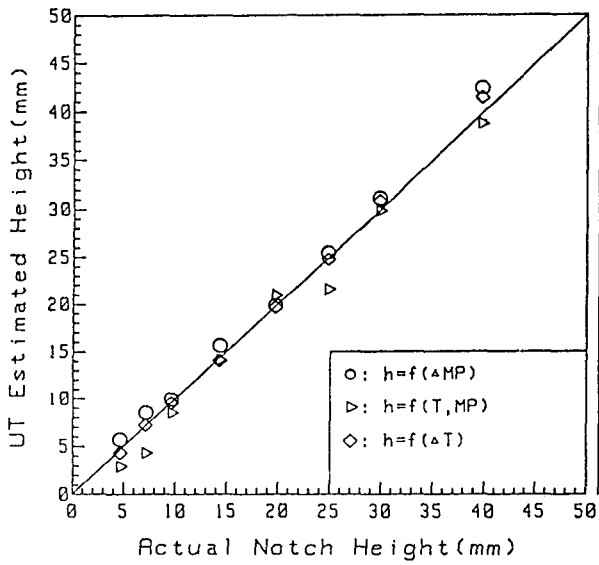
Fig. 10 Defect height calulation with the assumption of the same wedge exit point.

으로 주사된다고 가정하여 삼각함수 방법을 이용하여 빔 노치의 코너와 선단까지의 빔 행정 거리로서 결함높이를 측정한다, Fig. 10을 참조하여 계산한 결과가 식(2)가 된다.

$$h=T-(MP1^2-MP\,2^2+T^2)^{1/2} \quad \cdots\cdots(2)$$

이외에도 초음파 장비대신 시간차를 정밀하게 측정가능하도록 cursor 기능이 내장된 Tektronix oscilloscope를 초음파 장비대신 이용하여 결함높이를 측정하였다. 식(3)은 식(2)를 Taylor 전개하여 간편식으로 표현한 것이다.

$$h=Vs * At/2\cos\theta \quad \cdots\cdots(3)$$



$f(\triangle MP)=\triangle MP/\cos\theta$

$f(T,MP)=T-[(MP1)^2-(MP2)^2+T^2]^{1/2}$

$f(\triangle T)=V * \triangle T/\cos\theta$

Statistical Parameters		f(△MP)	f(T,MP)	f(△T)
Linear Regression Y=AX+B	A	1.0352	1.0284	1.051
	B	.3905	-1.6952	-.7693
Correlation Coefficient	R	.9985	.9937	.9993
Mean of Deviation	D	1.05	1.4625	.5125
Critical Miscall		0	0	0

Fig. 11 Accuracy of estimates of notch height made by various calculation using 45 deg., 3.5 MHz. 0.5″×0.5″ transducer.

이때 횡파속도(Vs)는 시편에서 종파속도를 실측한 다음 Poisson비(μ)을 이용하여 계산하였다.

$$Vs = \alpha * V_L = 0.5528 \times 5956 = 3296\ (m/sec)$$

여기서 $= \{(1-2\mu)/2(1-\mu)\}^{1/2}$,

$\mu = 0.28$ (강의 경우)

이상의 세가지 계산방법을 이용하여 측정한 결함크기를 Fig. 11에서 정리하여 통계자료와 함께 비교하였다. 그 결과 예상했던 대로 cursor 기능을 이용한 측정결과가 가장 정확하였으나 초음파장비로서 측정한 결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3-3 ASME방법에 의한 표면결함크기 측정

ASME Sec. V 코드에 의한 표면결함 크기는 검사체 두께의 2% 노치에 대한 초음파 신호진폭을 기준으로 하여 결함에서 나온 신호진폭의 비교값으로서 평가한다. 진폭에 영향을 미치는 인자중에서 초음파 빔 직경을 고려해 본 결과, Fig. 12에 나타난 대로 결함크기가 초음파 빔 단면적을 초과하는 경우 ASME 방법에 의한 결함크기측정이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 이때 Tip diffraction 방법을 보완적으로 사용하면 정확한 결함크기 판정에 도움이 될 것이다.

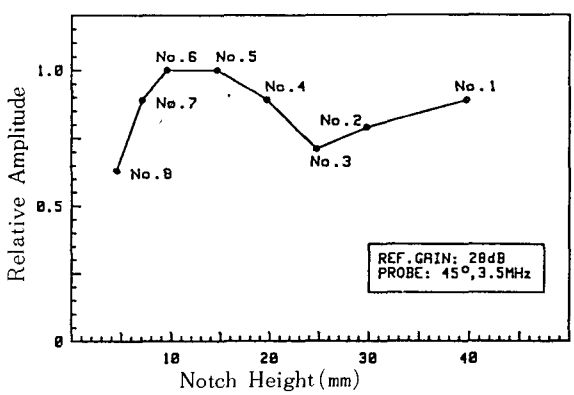


Fig. 12 Estimates of notch height with the ASME method.

4. 결 론

(1) 일반 초음파 검사방법과는 달리 결함감시기능을 목적으로 하는 경우 적정검사방법으로는 Tip Diffraction을 이용한 SPOT 방법이 가장 적당하였다.

(2) 초음파 탐촉자 선정시 최적주파수는 3.5MHz 이었고 최적빔각도는 본 실험 목적인 결함감시용으로는 가변각 탐촉자를 사용하여 45°에서 57° 사이에서 노치 결함높이에 따라 적절하게 선택할 수 있다.

(3) 원전에서 사용되는 압력용기와 같이 후판재료인 경우에는 노치와 같은 표면결함 높이 계산시 입사빔이 평행하게 주사된다는 가정이 가장 효율적이었다.

(4) 표면결함의 경우 Tip Diffraction 방법을 이용하면 기존 ASME 측정방법에 보완하여 결함크기 평가의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Y. Ogura, "Height determination studies for planar defects by means of ultrasonic testing.", the NDT journal, Vol. 1. No. 1, 1983. pp 22-29.

(2) "UT operator training for planar flaw sizing.", EPRI NDE center, competency area 911, learning module 8.

(3) L. Adler and D. K. Lewis, "Diffraction model for ultrasonic freqency analysis and flaw characterization.", Material evaluation (1977), pp. 51-55.

(4) E. Skudzryk, "The foundations of acoustics", Springer-varlag (1971), pp. 584-592.

(5) M. G. Silk, "Sizing creak-like defects

by ultrasonic means.", research techniques in NDT, Vol, Ⅲ (1977), pp. 51-99

(6) H. Wustenberg and A. Erhard, "Matching of ultrasonic flaw sizing methods to the defect type and location", nuclear engineering and design 81 (1984) pp. 51-99.

(7) D. K. Mak, "Ultrasonic methods for measuring crack location, crack height and crack angle" ultrasonics (1985)

(8) Krautkramer, "Ultrasonic testing of materials", Springer-Verlag(1977), pp. 17-22.

(9) "Rules for construction of nuclear power plant components.", section V of ASME boiler and pressure vessel code, the ASME, New York (1983)

(10) "High temperature ultrasonic instrumentation for continuous monitoring of flaw BWR plants.", EPRI RPT104(1986)

(11) A. Rogerson and R. A. Murgatroyd. "defect characterization using ultrasonic techniques.", research techniques in NDT, Vol. Ⅵ (1980), pp. 451-507.