

ASME 및 CSA 코드에 의한 초음파 결함 크기 측정

박문호*, 강석철**

* 한전기공(주)

** 한국원자력안전기술원

초 록 국내 원자력발전소 가압경수로 및 가압중수로에 대한 가동중검사 수행 동안 초음파 검사로 검출된 결함을 ASME 코드에서 기술한 center line beam 방법과 CSA 코드에서 기술한 6 dB drop 방법을 이용한 결함의 길이 방향 크기 및 깊이를 측정 비교·분석하므로써 두 방법을 정확히 이해하고 결함 평가에 대한 신뢰성 향상 및 원전의 건전성을 확보하고자 한다.

1. 서론

국내 원전 가압경수로(pressurized water reactor: PWR) 및 가압중수로(pressurized heavy water reactor: PHWR)에 대한 원전 가동전검사(pre-service inspection: PSI) 및 가동중검사(in-service inspection: ISI) 수행 동안 초음파검사로 검출된 결함의 크기(길이 및 깊이) 측정 방법은 관련 적용 코드에 따라 다소 차이가 있다. 즉, 국내 가압경수로의 경우 미국의 ASME(American society of mechanical engineers) 코드 section V 및 XI을 적용하고 가압중수로의 경우는 캐나다의 CAN/CSA-N285.4 코드를 적용하여 결함 크기를 측정·평가한다. 이와 같이 초음파검사 결과를 이용해서 정확한 결함 크기를 측정하기 위해 여러 방법들이 연구·개발되어 왔다. 이러한 결과로 채택된 국가 표준 규격들은 나름대로의 수많은 연구와 분석을 통해 사용되어 왔으므로 ASME 및 CSA 코드에 기술된 방법을 상대적으로 비교하여 어떤 코드의 결함크기 측정 방법이 정확하다고 결론 내리는 것은 바람직하지 않다고 생각된다. 따라서, 이 보고

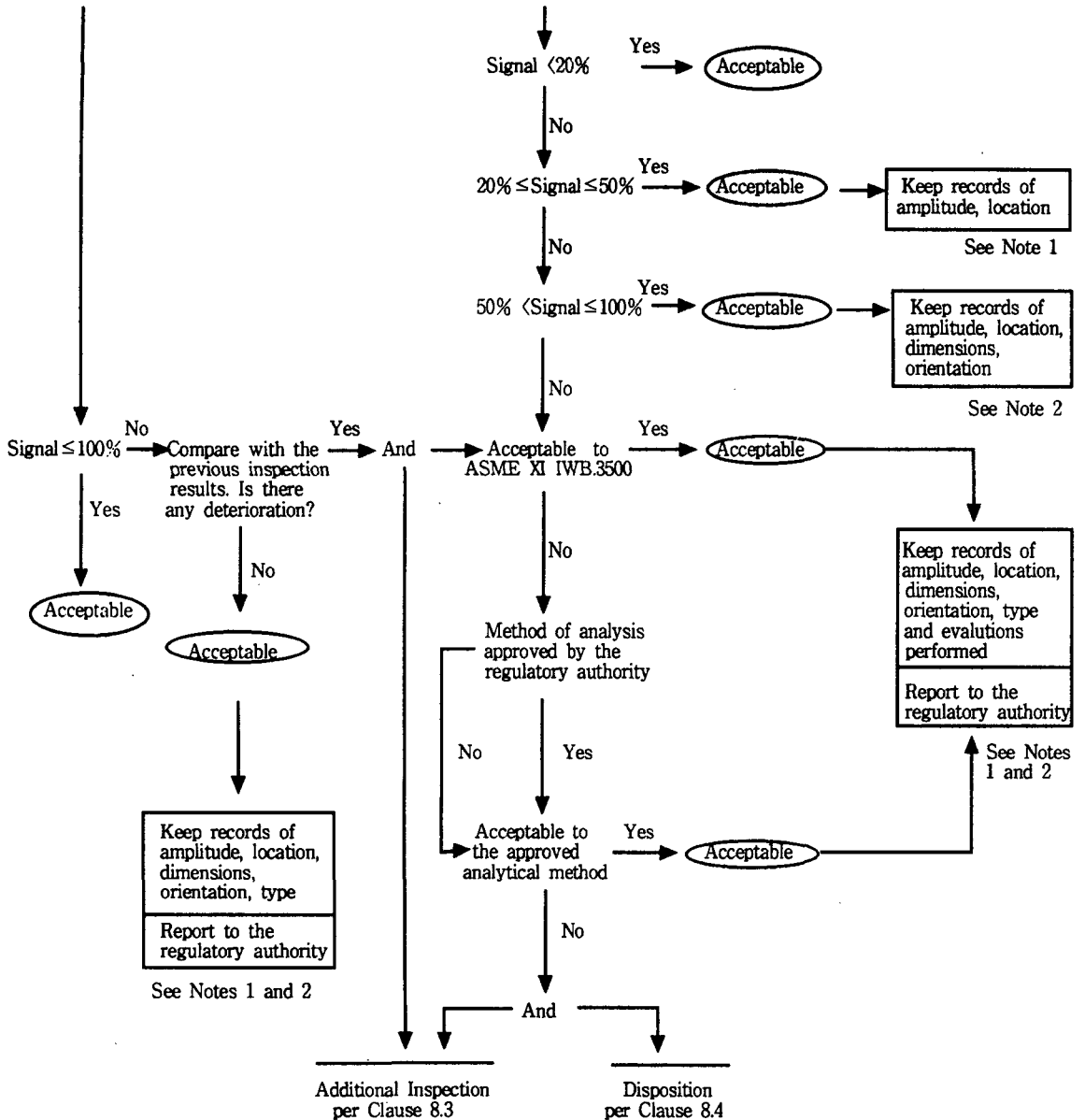
서에서는 각 코드마다의 결함 측정 및 평가 방법을 정확히 이해하고 관련 코드에 의해 발견된 결함의 지속적인 감시 및 관리에 대한 방안을 수립하는데 기초적인 자료로서 활용코자 ASME 및 CSA 코드에 기술된 초음파 결함 크기 측정방법을 비교·분석하였다.

오랫동안 초음파검사로 검출된 결함들에 대해 정확한 크기 측정을 하기 위해 특수 탐촉자 및 장비 개발 등과 같은 여러 가지 방법들이 계속적으로 연구¹⁻⁸⁾되어 왔다. 그러나, 원자력발전소의 경우 각국의 관련 법규에 따라 적용 코드를 달리하여 가동전·중검사를 수행하므로 이들 적용 코드에 따라 평가 방법도 다르다. 즉, 국내 가압경수로의 적용 코드인 ASME 코드는 일반적으로 알려진 center line beam 방법으로 결함의 길이 및 깊이를 측정하고 가압중수로의 적용 코드인 CSA 코드는 6dB drop법을 사용하여 기록·평가토록 되어있다. 특히, 가압중수로의 경우에 CSA 코드(1994년도판)에 명시된 대로 결함의 길이는 6dB drop 방법으로 측정하여 평가하고 깊이는 6dB/half beam width 방법으로 측정하여

CAN/CSA-N285.4-94

Periodic Inspection

Inaugural Inspection



Notes :

- (1) Inspection records shall meet the requirements of clauses 11.1 and 11.2.
- (2) Inspection records shall meet the requirements of clauses 11.3.

Fig. 1 Acceptance standards, recording and reporting, criteria for weld inspection area : ultrasonic inspection method (not applicable to bolts and nuts)

beam spread를 사용하여 결함의 크기를 수정·평가한다. 따라서, 이러한 초음파 결함 평가 방법을 정확히 분석하여 현장에서 검출된 결함을 보다 정확히 평가할 수 있는 기초를 마련하고 검사의 신뢰성을 향상시켜 발전소의 건전성을 확보하고자 함이다.

2. 기록 및 측정 방법

가압중수로 원자력발전소는 Fig. 1과 같이 캐나다 코드 CAN/CSA-N285.4-94에 명시된 대로 100% DAC(distance amplitude correction) 초과 지시에 대해서만 평가하여 지시의 합격여부를 ASME section XI IWB-3500에 따라 판정토록 되어 있다. 이러한 100% DAC 초과 지시에 대한 CSA 코드(1994년도판) 및 ASME 코드(1989년도판)에 기술된 결함크기 측정방법은 Table 1과 같이 요약된다.

Table 1 Techniques of flaw sizing described in CSA and ASME code for reflectors exceeding 100% DAC

code	through wall dimension	length	beam profile	remark
CSA	6dB/half beam width method	6dB drop method	applicable	CAN/CSA-N285.4-94 paragraph 4.2.5
ASME	50% of maximum amplitude	20% DAC	not applicable	

2.1. ASME 코드에 의한 결함길이 측정 방법

ASME 적용년도의 코드에 따라 초음파지시의 기록방법은 다소 차이가 있지만, 본 보고서에서는 ASME 코드 section V 및 XI^{9, 10)}(1989년판)에 언급된 기준으로 50.8mm(2") 이상 두께의 압력용기에 대해서만 기록 기준 및 평가방법을 기술하였다. 이 기록 기준은 ASME section XI appendix I supplement 10 및 ASME section V article 4에 기술된 바와 같이 20% DAC 이상의 지시(indication)들을 모두 기록하여 기하학 혹은 금속학 조직에 기인한 신호를 구분토록 되어 있으며, 100% DAC 초과 지시부에 대해서는 최대 진폭크기의 50%(50% of maximum amplitude)되는 지점까지 탐촉자를 움직여 이동 거리를 측정하고, 100% DAC 이하의 지

시에 대해서는 20% DAC에 일치토록 하여 이동 거리를 측정한다.

이렇게 측정된 지시는 일반적으로 beam center line 방법으로 다음과 같은 절차에 따라 깊이방향 결함 크기를 측정한다.

- 1) 일정한 배율의 용접부를 포함한 검사부위의 형상 위에 최대 진폭을 나타내는 탐촉자 입사점의 위치(W_{max})를 정한다.
- 2) 이 지점에서 실제 빔 각도를 가진 직선을 그려서 중앙 빔을 표시한다.
- 3) 중앙 빔 위에 측정된 빔 진행거리(metal path)를 표시한다.
- 4) 같은 방법으로 전후로 움직여 측정된 탐촉자의 각 위치(전: W_1 , 후: W_2)에서의 빔 진행거리를 표시한다.
- 5) 중앙 빔에 표시된 진행거리의 점을 경유해서 표시된 두 점을 연결함으로써 만들어진 최종 직선이 해당 지시부의 단면 높이를 나타낸다.

2.2. CSA 코드에 의한 결함깊이 측정 방법

100% DAC 초과 지시에 대해서 1983년도 코드¹¹⁾인 CAN/CSA-N285.4-M83에는 CAN/CSA-N285.4-94에 기술된 것처럼 결함크기 측정 방법이 명확히 기술되어 있지 않아 beam center line 방법으로 평가를 하였다. 그 이후에 발간된 1994년도 코드¹²⁾인 CAN/CSA-N285.4-94에는 지시의 길이방향 크기측정은 6 dB drop 방법, 깊이방향 크기측정은 6dB/half beam width 방법으로 측정하여 Fig. 2와 같은 양식의 투명 아스테이지에 그려진 beam profile로 Fig. 3과 같이 보정·평가토록 기술^{13, 14)}되어 있다. 이와 같이 측정된 지시는 ASME section XI IWB-3500에 따라 합격여부를 판정토록 되어 있다.

- 1) 일정한 배율의 용접부를 포함한 검사부위의 형상 위에 최대 진폭을 나타내는 탐촉자 입사점의 위치(W_{max})를 정한다.
- 2) 이 지점에서 실제 빔 각도를 가진 직선을 그려서 중앙 빔을 표시한다.
- 3) 중앙 빔 위에 측정된 빔 진행거리를 표시한다.
- 4) 같은 방법으로 전후로 움직여 측정된 탐촉자의 각 위치에서의 빔 진행거리를 표시한다.
- 5) 투명 아스테이지판에 적당한 배율로 그려진 빔 퍼짐각(beam spread)을 사용하여 앞 지점 (W_1)

에서는 back of beam을 이용하고 뒤 지점(W₂)에 서는 front of beam을 사용하여 빔 진행거리를 표시한다.

- 6) 중앙 빔에 표시된 진행거리의 점을 경유해서 이 두 점을 연결함으로써 만들어진 최종 직선이 해당 지시부의 단면 높이를 나타낸다.

2.3. 코드에 따른 결함크기 평가

ASME 코드 section V article 4에 기술된 바와 같이 깊이방향 결함크기는 측면공(side drilled hole: SDH)을 사용하여 Fig. 4와 같이 DAC 곡선을 작성한 후 결함의 깊이 및 길이 방향 크기를 아래와 같은 식으로 구한다.

$$2d = (MP_{j,2} - MP_{j,1}) \times \cos \gamma \dots\dots\dots (1)$$

$$L1 = |L_{j,2} - L_{j,1}| \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

MP_{j,2} : 측정된 결함의 하단부 까지의 빔 진행거리

MP_{j,1} : 측정된 결함의 상단부 까지의 빔 진행거리

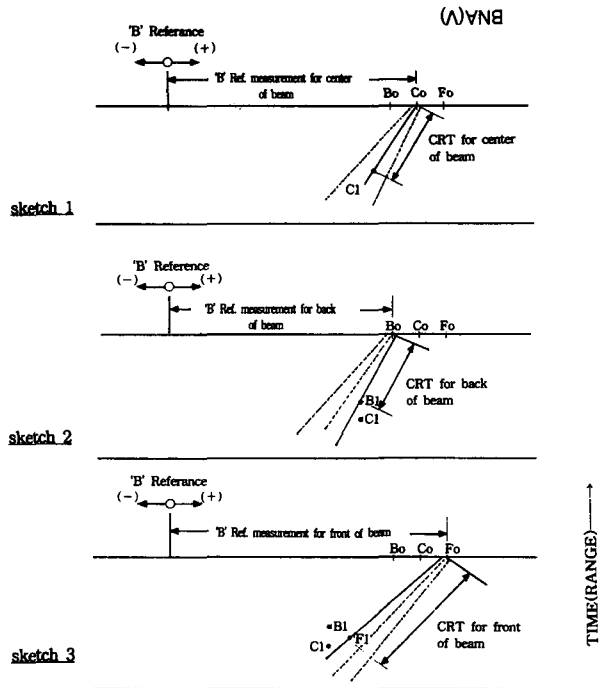


Fig. 3 Flow sizing with 6dB/half beam width method (CSA code)

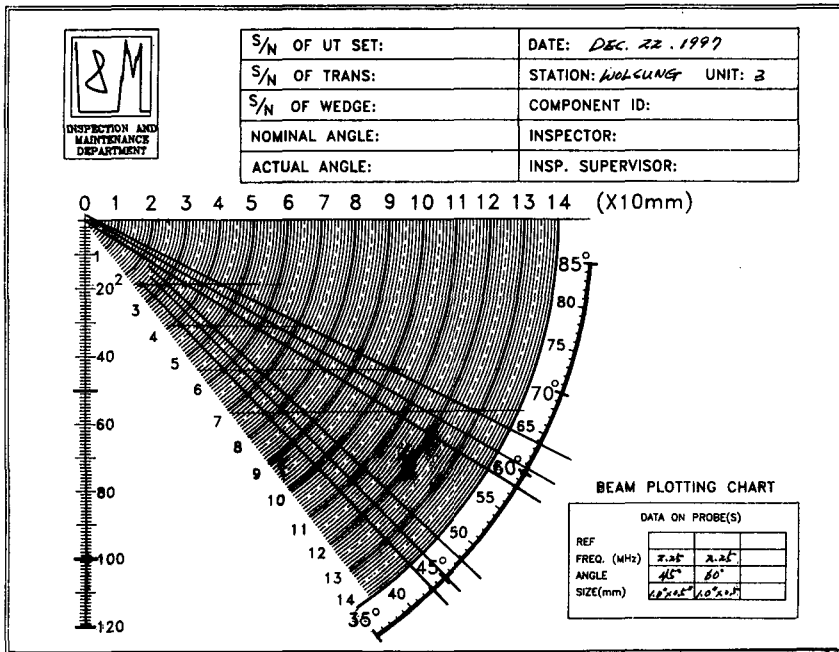


Fig. 2 Transparency of beam profile diagram

- j : 결함 끝단을 결정하기 위한 기준 %DAC
- 2d : 결함의 깊이방향 크기
- Lj,2 및 Lj,1 : 결함 길이 측정을 위해 기준점에서 결함 끝점까지의 거리
- γ : 탐촉자 굴절각

그러나, 실제로 결함의 깊이방향 크기는 검사표면의 거칠기 및 검사부위 형상에 따라 달라지므로 계산식으로 크기 측정을 할 때는 검사부위의 형상 및 표면상태 등 검사 조건 상태가 만족되는가를 확인한 후 사용하여야 하며 그렇지 않을 경우에는 계산식만으로 결함 크기를 측정해서는 안 된다. 이렇게 하여 계산 또는 실제 측정된 깊이방향의 결함크기는 먼저 결함의 특성을 표면적하결함(subsurface flaw) 또는 표면결함(surface flaw)으로 구분¹⁵⁾하고 ASME 코드 section XI IWB-3500의 허용기준에 따라 결함의 합격여부를 판정한다. 한편, CSA 코드 방법에 의해 결함의 길이는 상기에 기술된 바와 같이 식(2)을 이용하여 구할 수 있으나 100% DAC 초과외 지시에 대해서 결함의 깊이방향 크기는 beam profile을 적

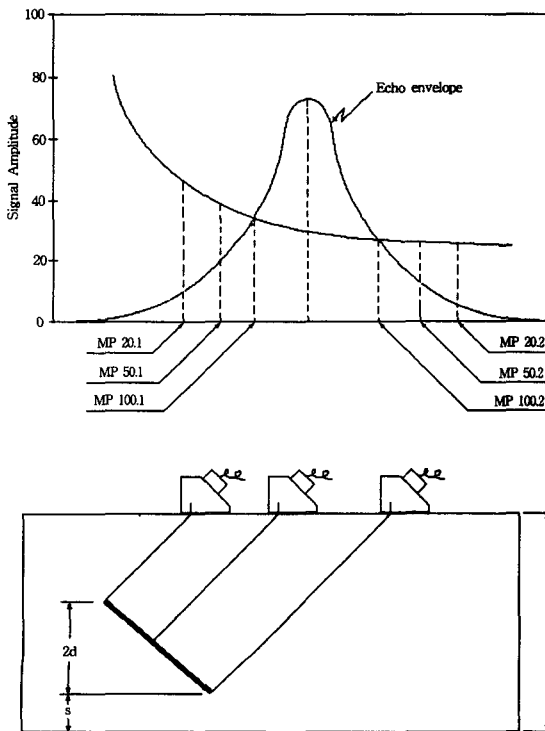


Fig. 4 Flaw sizing with center line beam method (ASME code)

용해서 측정하기 때문에 검사 조건을 만족한다고 할 지라도 식(1)을 이용한 깊이방향 계산 값을 그대로 사용할 수 없으므로 일정한 배율로 그려진 검사부위 형상에 초음파 빔을 작성(plot)하여 보정한 깊이방향 크기를 ASME 코드 section XI IWB-3500의 허용기준에 따라 합격여부를 판정한다.

3. 실험

원전 가동전·중 검사에 사용되는 기본교정시험편(basic calibration block) 및 수동초음파 장비로 각종 탐촉자를 사용하여 측정된 초음파 데이터를 ASME 코드 및 CSA 코드에 기술된 방법으로 결함 크기를 측정하였다.

3.1. 시험편

시험편으로는 Table 2와 같은 기본교정시험편을 사용하여 길이(length)는 노치를 이용하고 깊이방향 크기(through wall dimensions)는 시험편의 측면공을 이용하여 측정하였다. 그러나, ASME section XI app. VIII 자격인증 시험용으로 제작되어 있는 일부 thermal fatigue(TF) 및 mechanical fatigue(MF) 결함의 시험편은 배관용으로서 곡률 반경이 작아서 압력용기 검사용 탐촉자로는 접촉상태가 좋지 않아 정확한 결함 측정이 어렵고 시험편 두께가 25.4mm(1") 이하이기 때문에 빔 진행거리가 짧아 beam spread 영향을 분석할 수 없기 때문에 50.8mm(2") 이상 시험편인 기본교정시험편에 대해서만 실험을 수행하였다.

Table 2 Specification of basic calibration block

basic calibration block	size (mm)	material	remark
WUB-002	550×300×76.2	SA516 GR70	steam generator
WUB-303	509×200×127	C/S	pressurizer & degasser condenser

3.2. 장비 및 탐촉자

장비는 미국 Staveley Technologies Inc. 제작의 수동장비인 Sonic-137 Plus로 Table 3과 같은 초음파 탐촉자를 사용하여 측면공 및 노치의 크기를 측

정하였으며 각 탐촉자 마다 정확한 beam spread 작성을 위해 Fig. 5와 같은 직경 1.5mm인 IOW beam calibration block (steel, S/N 92-7791, NDT Systems)을 사용하였다.

Table 3 Transducer specification used in the experiment

size (inch)	frequency (MHz)	nominal angle (°)	manufacture co. (serial no.)
0.5×1.0	2.25	45	KB-AEROTECH (002M91)
0.5×1.0	2.25	60	KB-AEROTECH (002PDM)
0.5 dia.	5	45 & 60	KB-AEROTECH (005MNF)

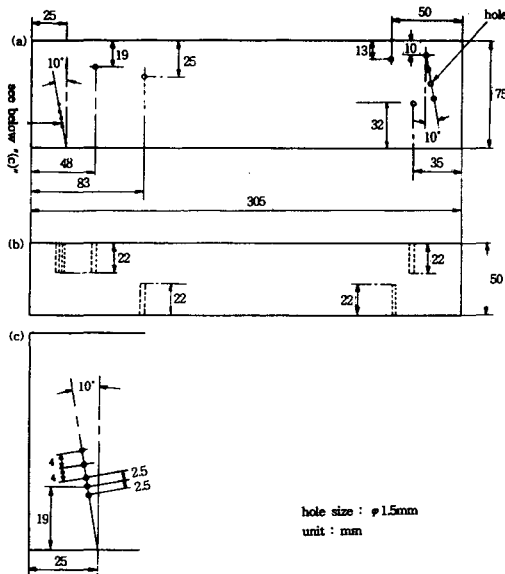


Fig. 5 IOW beam calibration block

4. 실험 결과 및 고찰

ASME 코드의 beam center line 방법과 CSA 코드의 6 dB/half beam width 방법으로 결함크기를 측정 비교하면 다음과 같다. 실험결과, 일반적으로 탐촉자의 beam spread 보다 큰 결함에 대한 길이방향의 측정 크기는 Table 4-1 및 Table 4-2와 같이 CSA code의 6dB drop 방법이 ASME code의 20%

DAC 측정 방법보다 작게 나타나며 탐촉자의 beam spread 보다 작은 길이방향의 크기는 CSA code의 6dB/half beam width 방법이 ASME의 center line beam 방법보다 실제 측면공 크기(직경 1.5mm 및 직경 3mm)에 근접하게 나타났다. CSA 코드에 의한 길이방향 크기 측정은 beam spread에 의해 영향을 받기 때문에 정확한 beam spread 작성이 대단히 중요하다.

Table 4-1 Comparison of measured notch length in 76.2mm thickness block containing 4.76mm diameter side-drilled hole and actual notch length 50.5mm

code	2.25 MHz (0.5"×1.0")		5 MHz (0.5" dia.)	
	45°	60°	45°	60°
CSA (6dB drop)	48mm	45mm	47mm	46mm
ASME (20% DAC)	55mm	49mm	54mm	51.5mm

Table 4-2 Comparison of measured notch length in 127mm thickness block containing 1.5mm diameter side-drilled hole and actual notch length 50.5mm

code	2.25 MHz (0.5"×1.0")		5 MHz (0.5" dia.)	
	45°	60°	45°	60°
CSA (6dB drop)	48mm	46mm	47.5 mm	47mm
ASME (20% DAC)	55mm	52mm	55.5 mm	51mm

한편, Fig. 6과 같이 ASME 코드 방법에 따라 측정 한 데이터를 분석해 보면 탐촉자로 부터 멀리 떨어진 결함일수록 길이방향 크기가 더 커지게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것을 IOW block을 사용하여 작성한 beam spread로 길이방향 크기를 수정하여 측정한 것이 CSA 코드에 의한 방법이다. 또한, ASME 코드를 사용하여 45도 각도로 측정 한 결함 크기 보다 60도 각도로 측정 한 결함의 크기가 크게 나타나는 것은 초음파 빔 진행거리가 45도 각도 보

다 60도 각도가 길기 때문에 beam spread의 영향을 많이 받기 때문이다. 따라서, 같은 위치에 있는 결함의 깊이방향 크기일 지라도 ASME 코드에 의한 방법은 초음파 빔 진행거리가 길어지면 결함 크기가 짧을 때 보다 크게 평가된다는 것을 알 수 있다.

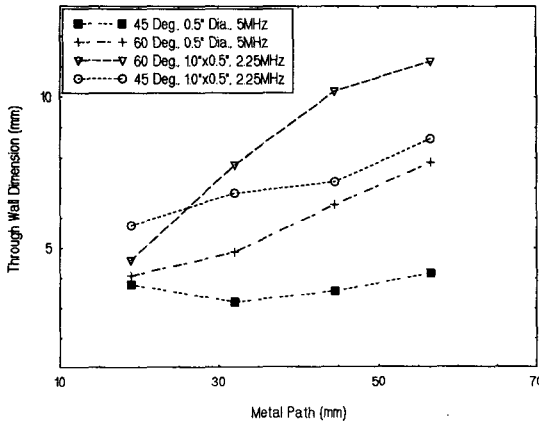


Fig. 6 Relation between metal path and through wall dimension measured by center line beam method(ASME code)

5. 결론

- 1) beam spread 보다 큰 결함의 길이방향의 크기에 대해 CSA 코드에 명시된 6dB drop 방법이 ASME의 20% DAC 끝점으로 측정된 길이 보다 짧게 나타났다.
- 2) 탐촉자의 beam spread 보다 작은 인공결함인 측면공에 대해 CSA 코드에서 기술한 6 dB/half beam width 방법과 ASME 코드에서 기술한 center line beam 방법으로 깊이 방향 크기를 측정된 결과, 6dB/half beam width 방법이 center line beam 방법 보다 측면공의 깊이 방향 크기가 정확하게 나타났다.
- 3) ASME 코드에 기술된 center line beam 방법에 의해 결함의 깊이 방향 크기를 측정할 때 탐촉자로 부터 멀리 떨어진 결함일수록 실제 결함 크기 보다 더욱 크게 나타났으며, CSA 코드에 기술된 방법 같이 beam spread를 적용하여 평가하면 실제 결함의 크기에 근접시킬 수 있었다.

참고 문헌

- 1) L. Paradis, Y. Serruys and R. Saglio, A Time-of-Flight Method for Crack Evaluation Using Focused Ultrasonic Probes, Materials Evaluation/44(1986), pp. 568-570
- 2) G. J. Gruber, G. J. Hendrix, and W. R. Schick, Characterization of Flaws in Piping Welds Using Satellite Pulses, Materials Evaluation/ 42(1984), pp. 426-432
- 3) M. G. Silk, Changes in Ultrasonic Defect Location and Sizing, NDT International Vol. 20, No. 1(1987), pp. 9-14
- 4) D. K. Mak, Locating Flaws in Three-dimensional Space Using a Transmitter-receiver System, NDT International Vol. 20, No. 2(1987), pp. 117-120
- 5) Y. Ogura, Height Determination Studies for Planar Defects by Means of Ultrasonic Testing, The Nondestructive Testing Journal, Japan, Vol. 1, No. 1(1983), pp. 22-29
- 6) M. Onozawa and Y. Ishii, Experimental Measurement of Flaw Height by Ultrasonic Testing -Effective Beam Spread Angle Method-, J. of JSNDI, Vol. 26, No. 5(1977) pp. 324-329
- 7) 이주석, 초음파 탐상에서의 결함크기 평가에 관한 일반적인 고찰, 비파괴검사학회지, Vol. 2, No. 1(1982), pp. 17-24
- 8) Accuracy of Ultrasonic Flaw Sizing Techniques for Reactor Pressure Vessel, EPRI NP-6273, (1989)
- 9) Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Section V, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An American National Standard, (1989) Edition
- 10) Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Section XI, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An American National Standard, (1989) Edition
- 11) Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components, CAN3-N285.4-M83, National Standard of Canada, Canadian

- Standard Association, (1983)
- 12) Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components, CAN/CSA-N285.4-94, National Standard of Canada, Canadian Standard Association, (1994)
 - 13) Inspection Practice for Determining the Length and Width of Indications Using Longitudinal and Shear Waves and Vertical Extent Using Shear Waves, N-03640.1.02H
 - 14) Inaugural Ultrasonic Inspection of CANDU Steam Generator and Components to N285.4, NDE Process Procedure #355609, BABCOCK & WILCOX, Cambridge, Ontario
 - 15) 김병철 외 3명, 초음파검사시 ASME와 RCC-M Code에 따른 결함크기 측정 및 허용기준 비교평가, 한국비파괴검사학회지, Vol. 8, No. 1(1988)

Flaw Sizing by ASME and CSA Code

Moon Ho Park* and Suk Chul Kang**

* Korea Plant Service & Engineering Co., Ltd, Seoul 100-430

** Korea Institute of Nuclear Safety, Taejon 305-600

Abstract To record and evaluate the flaws which were found during pre-service/in-service inspection performance of nuclear power plants in Korea, the center line beam method described in ASME code and 6 dB drop method stated in CSA code were used. The measured through wall dimensions and lengths by these methods were compared and analyzed in this report. With the measured data analysis, the exact understanding and use of these methods improves the reliability of flaw sizing and assures the integrity of nuclear power plant components.