論 文

韓國非破壞檢査學會誌
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
第17號 Vol. 10, No. 1 (1990)

초음파진행 시간차에 의한 STUD[BOLT] 나사산의 미세한 결함검출

서 동 만* · 박 대 영* · 김 종 교**

Ultrasonic Detection of Small Crack in Studs[Bolts] by Time Difference of Thread Signals(TDTS)

D. M. Suh, D. Y. Park *and* C. K. Kim

Abstract It is difficult to detect such flaws as stress-corrosion cracking or corrosion wastage(loss of bolt diameter) in the threads. In many cases the critical size of a flaw is very small(1−2 mm order). This paper describes how it is possible to discriminate small flaw indications in threads using the time difference of thread signals[TDTS] by a signal-conditioning technique.

1. 서 론

원자력발전소의 정기보수기간에 실시하는 주요 발전설비 및 부품에 대한 가동중 검사는 원자력 발전소의 안전성 확보면에서 매우 중요하다.

현재 국내 원자력발전소의 압력 용기(Reactor pressure vessel)와 증기발생기(Steam generator tube)에 대해서는 자동화 장비로 비파괴검사를 수행하고 있는 반면, 이들을 제외한 대부분의 부품 및 계통에 대해서는 검사자의 기능에 의한 수동검사를 수행하고 있다. 이러한 수동 검사는 발전소 운전 시간의 경과에 따른 발전소의 노후화로 인한 검사자의 방사선 피폭량의 증가 때문에 검사수행의 문제로 대두되고 있다. 따라서 원자력 발전소의 가동중 검사에서 검사자의 방사선 피폭량을 감소시키고 검사의 신뢰성을 향상시키기 위해 검사 및 검사 신호처리 자동화가 요구되고 있는 실정이다.

현재 국내 원전의 압력용기와 냉각수 펌프 stud bolt 검사는 검사자가 수동으로 탐촉자를 일정한 각도로 회전 시키고 수직으로 이동하면서 검사를 수행하고 있다. 그러나 검사자가 수동으로 일정한 각을 정확히 회전시키며 검사를 수행하기란 어렵고 나사산으로 부터의 신호 양상이 나사산 자체에서 반사되는 geometric 신호와 결함 신호가 혼성되어 나타남으로써

* 한국원자력연구소 비파괴시험연구실
** 전북대학교 전자공학과
1990년 2월 15일 접수

결함신호를 찾기가 어려운 실정이다.

이러한 나사산의 Corrosion wastage (Loss of bolt diameter)나 Stress - corrosion cracking은 그 크기가 1−2mm 정도에 이르면 성장이 급진전 되어 파손에 이르는 경우가 발생되어 원전의 안전에 문제가 되고 있다.(1−3) 그러나 사실상 이정도 크기의 결함은 사고(Table 1)가 발생되기 전까지도 검출하지 못하였으며 이러한 문제로 외국에서는 원전 기술자들의 연구 대상이 되고 있고(4−5), ASME에서는 이러한 중요성을 인식하여 최신판인 ASME section XI App. VI에서 stud bolt 나사산의 결함 검출을 위한 검사자의 자격인증에 대하여 별도로 언급하고 있다.[6]

Table 1 Summary of degraded thread fasteners in reactor coolant pressure boundary.

DEGRADED REACTOR COOLANT PRESSURE BOUNDARY THREADED	NO. OF REPORTED INCIDENTS	PLANTS(YEAR INCIDENT REPORTED) &REACTOR VENDOR	MODE OF FAILURE*
PRESSURIZER MANWAY CLOSURE STUDS	2	CALVERT CLIFFS 2(1981) C-E St.LUCIE 1 (1978) C-E	BC BC
STEAM GENERATOR MANWAY CLOSURE STUDS	7	MAINE YANKEE(1982) C-E OCONEE 3(1980) B&W ARKANSAS 1(1978) B&W ARKANSAS 1(1980) B&W CALVERT CLIFFS 1(1980)C-E St. LUCIE 1(1977) C-E SAN ONOFRE 1(1977) W	SC SC BC SC BC BC SC
REACTOR COOLANT PUMP CLOSURE STUDS	5	Ft. CALHOUN(1980) C-E CALVERT CLIFFS 1(1980)C-E CALVERT CLIFFS 2(1981)C-E OCONEE 3(1981) B&W OCONEE 2(1981) B&W	BC BC BC BC BC
SAFETY INJECTION CHECK VALVE STUDS	1	CALVERT CLIFFS 2(1981)C-E	BC

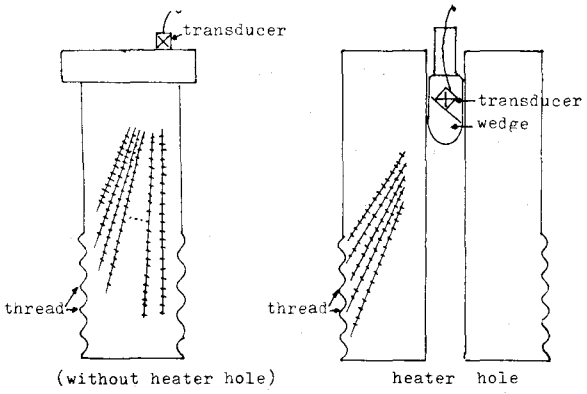
*SC= STRESS CORROSION; BC= BORATED WATER CORROSION

본 연구에서는 기존의 stud bolt 수동검사를 자동화한 자동 검사 장비를 이용하여 나사산에서 반사되어 나오는 복잡한 신호를 Gating과 Windowing 등의 Signal - conditioning 기법을 이용해 stud bolt 결함 신호와 나사산에서 반사되는 잡음 신호를 구분이 가능하게 할 수 있는 방법에 대하여 기술하였고, 나사산의 기하학적 특징으로 인해 발생되는 초음파의 진행시간(Time−of−Flight) 차이를 이용한 나사산 신호의 시간차(Time Difference of Thread Signals−TDTS)에 의한 결함 검출방법에 관해 연구하였다.

2. 이론적 고찰

stud bolt의 종류에는 bore가 있는 것과 없는 것이 있는데 bore가 없는 stud bolt는 수직 초음파검사를수행하고 bore가 있는 stud bolt는 사각 초음파검사를 수행하고 있다.[7]

stud bolt에 입사된 초음파신호는 stud bolt의 나사산에 의해 반사되는데 나사산과 산의 간격이 일정하기 때문에 반사되는 신호도 일정한 시간간격을 갖게 된다. Bore가 없는 stud bolt는 Fig. 1a와 같이 초음파가 입사되고 bore가 있는 stud bolt는 Fig. 1b 와 같이 초음파가 입사될때, 반사되는 신호는 Fig. 2와 같이 일정한 간격을 갖게 된다. 이러한 반사 신호를 전기신호의 식으로 표현하면 식 1과 같다. (8−9)



(a) straight beam　　(b) angle beam

Fig. 1 Ultrasonic beam direction in stud bolt.

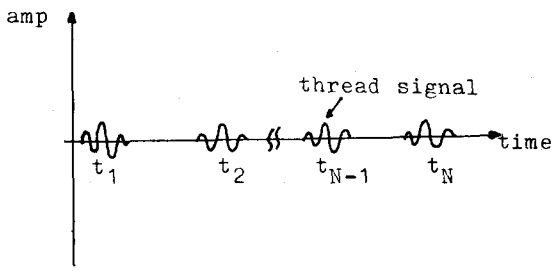


Fig. 2 Pulse train from stud bolt threads.

$$A(t)=A_0\sqrt{\alpha_s\lambda_p}\exp(-\alpha x)\sum_{n=0}^{N}\sin[n(2\pi f_d t)-2\pi(f_0/v)\,x] \quad \cdots\cdots (1)$$

where A_0 : amplitude exited in the surface of the material under test

α_s : attenuation coefficient due to scattering(diffusion)

λ_p : pulse length in a medium

f_0 : resonance frequency(center modulation frequency)

v : velocity in the material

x : wave path

α : the sum of the attenuation coefficient

f_d : pulse train frequency(repetition frequency)

식 1에서 나사산 반사신호들의 혼성이 일어나지 않게 하기 위해서는 초음파 탐촉자의 공진 주파수 f_0는 나사산 반사신호의 반복 주파수 f_d보다 2배 이상 커야 한다.

즉 $f_0 > 2f_d$ ····· (2)

그러나 나사산에서 반사되는 신호들은 매우 약할 뿐만 아니라 초음파의 진행거리가 검사체의 두께에 따라서 길기 때문에 이러한 진행시간차를 쉽게 구별하지 못한다. 그래서 나사산 신호의 signal-conditioning이 필요하다.

2-1 Time Difference of Thread Signals(TDTS)

여기서 사용된 Signal-conditioning 방법은 나사산에서 반사된 신호를 gate start, stop 값을 설정해서 그 gate 안의 신호를 정상적인 나사산 간격이나 그 보다 작거나 같고 또한 그 간격의 1/2 보다는 크게 window를 설정하고 (fig. 3) 그 window에서 가장 큰 신호와 그 신호에 해당하는 시간값을 찾는다.(fig. 4) 즉 정상적인 나사산 간격에 해당하는 초음파 진행시간을 Tdn이라 하고 window 가격을 Tw라 하면 Tw는

$$\frac{Tdn}{2} < Tw \leq Tdn \quad \cdots\cdots (3)$$

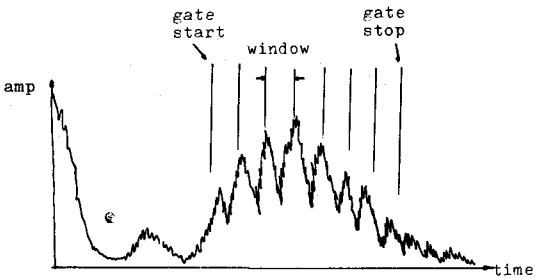


Fig. 3 Gating and windowing of thread signal.

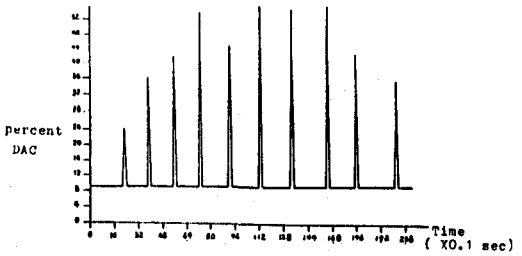


Fig. 4 Amplitude and time value of thread signal.

이다. 또한 측정된 시간차를 Td라 하면 결함의 크기를 결정할 수 있는 진행시간차

$$Tdd = Td - Tdn \quad \cdots\cdots (4)$$

이다. 여기서 Tdd는 나사산에 존재하는 미세한 결함 크기도 찾을 수 있다.

3. 실험 및 결과

Data수집은 제작된 자동초음파 stud 주사장치[10] 와 원자력 발전소 원자로 자동 검사장비의 data수집및 처리장치[11]를 이용했는데 자동초음파 stud 주사장치에서 나오는 초음파 신호와 위치정보는 data 수집장치에서 preprocessing 되어 GPIB를 통해 data처리 컴퓨터에 저장된다. (Fig.5) 실험에 사용된 탐촉자는 KB-AEROTECH GO6955, JO9182인데, 1/4인치 round 형이

며 공칭주파수 2.25MHz이다.

실험은 원자력발전소의 압력용기(RPV)와 냉각수펌프(RCP) stud bolt와 같은 재질을 사용했고, ASME Code에 의거 검사에서 적용하고있는 notch 크기인 2.7 mm(RPV), 2mm(RCP)를 기준으로 제작했는데[6], 현장에서 사용하고 있는 notch 크기보다 작은 것에 중점을 두었다. (Table 2)

제작된 notch에서 수집한 RCP stud 신호는 Photo. 1, 2, 3과 같고, RPV신호는 Photo 4, 5, 6과 같다.

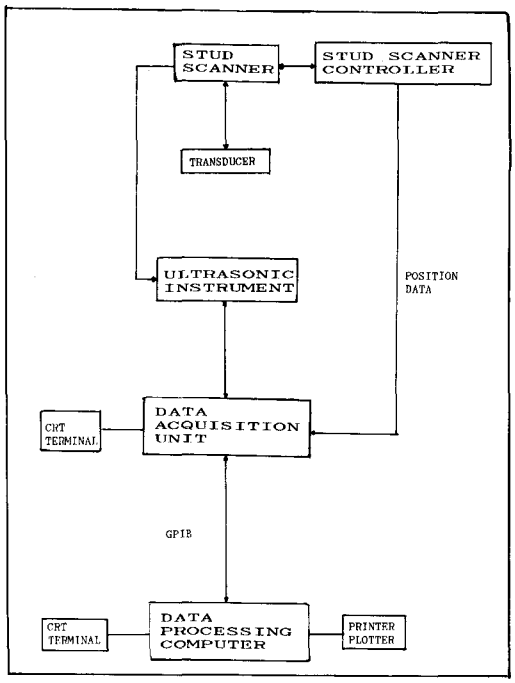
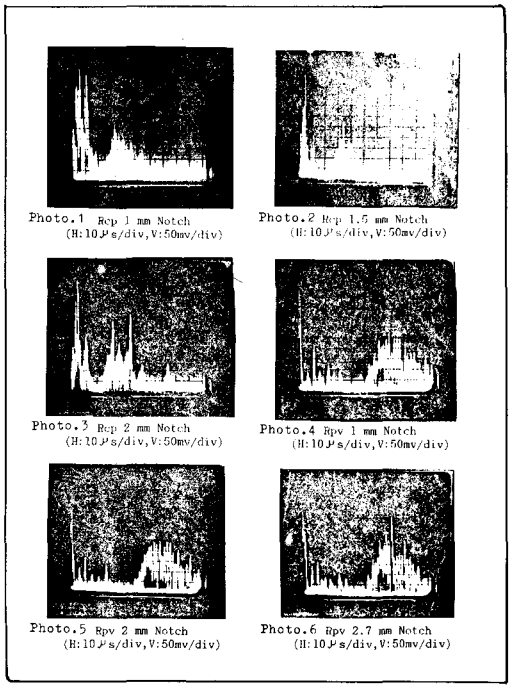


Fig. 5 Block diagram of data acquisition and processing system.

Table 2 Notch depth of test block

NOTCH #	RPV(mm)	RCP(mm)
1	1.0	1.0
2	2.0	1.5
3	2.7	2.0
4	4.0	3.0
5	6.0	4.0



3-1 실험 방법

현재 사용하고 있는 DAC(Distance Amplitude Curve) 결함 검출 방법과 여기서 연구된 Amplitude Ratio (AR), 그리고 파의 진행 시간(Time-of-Flight) 간격에 의한 방법(Time difference)에 의한 결과를 비교하였다.

3-1-1 DAC 방법

Stud bolt의 검사방법은 notch에서 나오는 신호 하나를 CRT 화면의 80%에 맞추어 DAC를 작성하고, DAC의 50% 이상되는 반사신호를 나타내는 초음파 반사체는 기록하고 DAC의 100%를 초과하는 지시부는 성질상 기하학적 결함이 아닌 것으로 조사 및 판명되었을때 사업주측에 보고하도록 되어 있다.[13] 그러나 notch에서 나오는 신호와 나사산에서 나오는 신호는 크게 차이가 나지 않기 때문에 미세한 결함까지 검출하는 데 어려움이 있다. Table 3은 나사산의 신호와 인공 결함신호의 차이와 보정시 신호의 크기를 표시한 것인데 notch가 작은 것은 noise와 구분이 되지않는다.

DAC 방법으로 결함을 찾을 경우 RPV stud 에서는 Fig. 6, 7에서 보는 바와 같이 2.7mm 이상의 결함은 검출하기 용이하지만 2.7mm 미만은 나사산에서 나오는 신호와 결함신호가 거의 같은 크기를 나타내어 결함을 검출하기 어렵고, RCP stud도 Fig. 8, 9과 같이 2mm 미만의 결함은 검출하기 어렵다.

Table 3 Amplitude of stud threads by DAC method

RPV NOTCH DEPTH (MM)	1	2	2.7	4	6
dB (20LOG NOTCH/NOISE)	0	0	4	6.9	6.9
PERCENT OF DAC	62	62	100	117	137
RCP NOTCH DEPTH (MM)	1	1.5	2.0	3.0	4.0
dB (20LOG NOTCH/NOISE)	1.1	2	3.8	3.8	6.7
PERCENT OF DAC	65	82	100	120	140

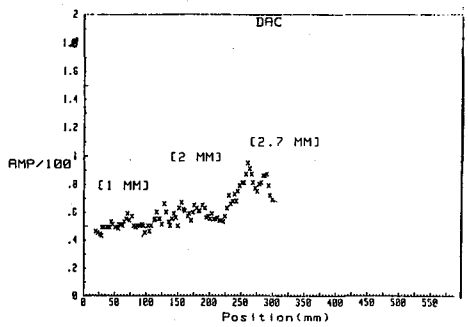


Fig. 6 RPV stud indications(1, 2, 2.7mm) by DAC.

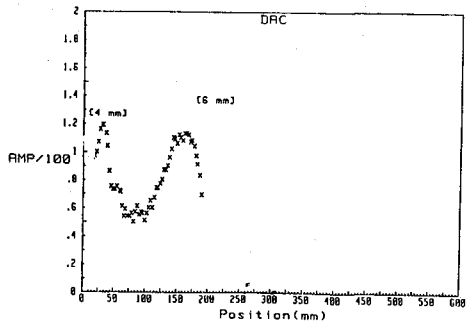


Fig. 7 RPV stud indications(4, 6mm) by DAC.

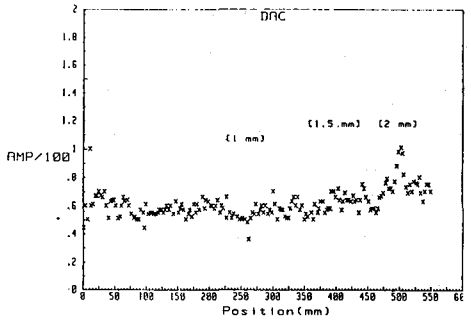


Fig. 8 RCP stud indications(1, 1.5,2mm) by DAC.

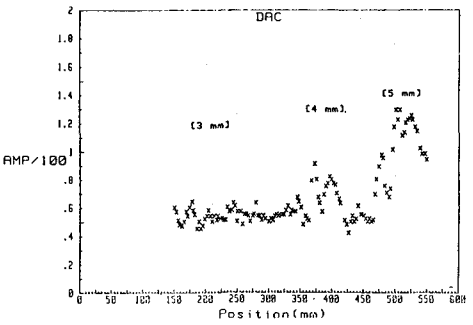


Fig. 9 RCP stud indications(3, 4, 5mm) by DAC.

3 - 1 - 2 Amplitude Ratio(AR)

초음파 신호 중 결함특징을 포함하고 있는 data만을 추출하기 위하여 DAC 10% 이상과 10개의 Window를 설정해서 data를 선택했는데, 수집된 RPV stud bolt와 RCP data 중 나사산으로부터 반사되어 나오는 잡음의 크기와 notch에서 나오는 결함의 크기를 비교하였다. 나사산에서 나오는 신호를 Ath라 하고 notch 결함에서 나오는 신호를 An이라 하면 두 신호의 비를 AR 이라하면

$$AR = \frac{An}{\overline{Ath}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

이다. 여기서 $\overline{Ath}$: Mean value of signals from threads

An : the highest signal form notch

$$\overline{Ath} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} Athi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

RPV, RCP의 notch 결함으로 부터 수집된 data를 AR 방법을 이용해 도시한 것이 Fig. 10, 11, 12, 13과 같은데, 이 방법은 DAC 방법과 거의 같은 결과를 얻을 수 있다.

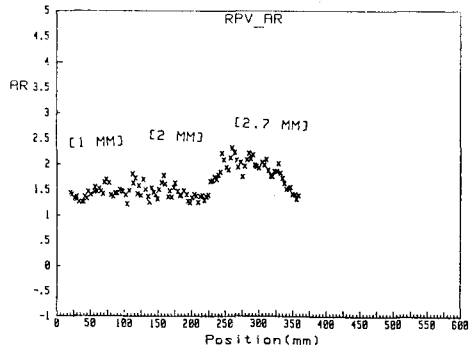


Fig. 10 RPV stud indications(1, 2, 2.7mm) by AR.

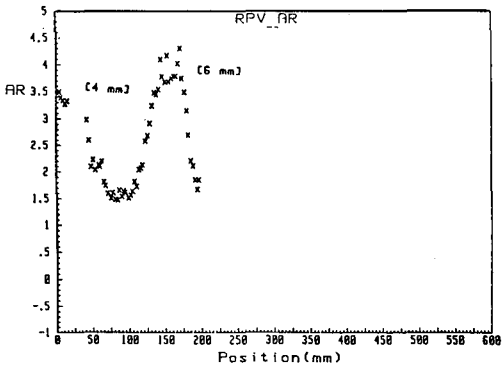


Fig. 11 RPV stud indications(4.6mm) by AR.

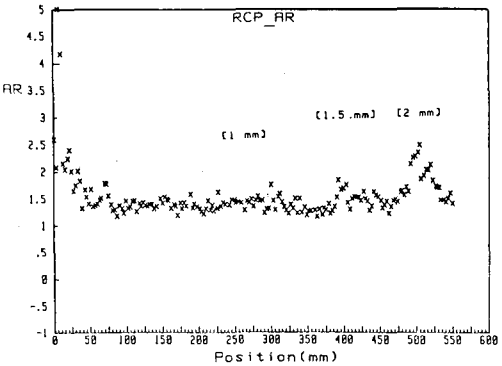


Fig. 12 RCP stud indications(1, 1.5, 2mm) by AR.

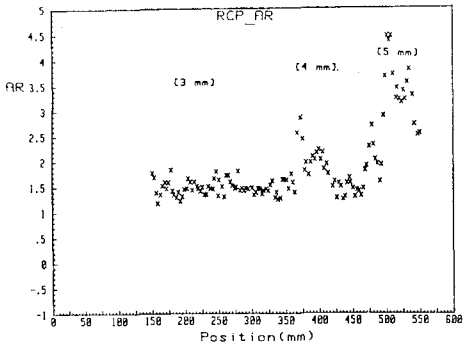


Fig. 13 RCP stud indications(3, 4, 5mm) by AR.

3-1-3 TDTS

TDTS에 의한 data 수집은 RPV stud bolt인 경우 gate 값을 75mm 그리고 RCP stud bolt는 30mm로 설정했다. 설정된 gate내에서 다시 10개의 window를 만들어 각각의 window에서 가장 큰 신호와 그 신호에 해당하는 시간값을 추출했다.(Fig. 14, 15, 16, 17, 18, 19) 추출된 신호사이의 시간값을 Td라고 하고, 정상적인 나사산에 해당하는 시간값을 Tdn이라 할때 Td에서 Tdn을 뺀 값은 나사산에 존재하는 미세한 결함까지 검출할 수 있다. 여기서 Td에서 Tdn을 뺀 값을 Tdd라고 하면

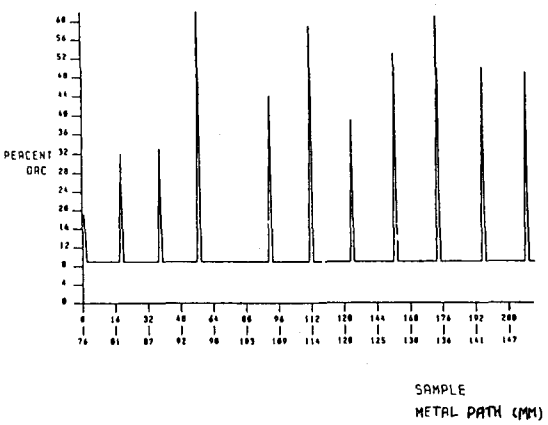


Fig. 14 RPV stud 1mm notch signals by window.

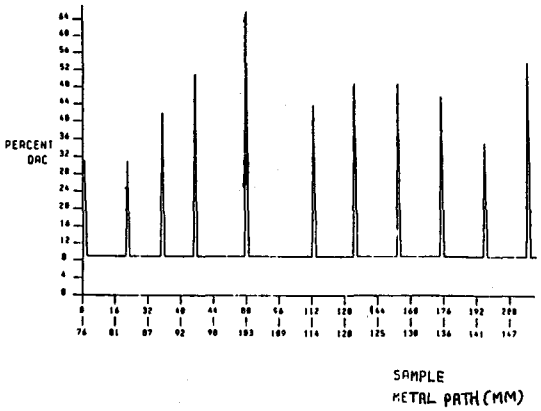


Fig. 15 RPV stud 2mm notch signals by window.

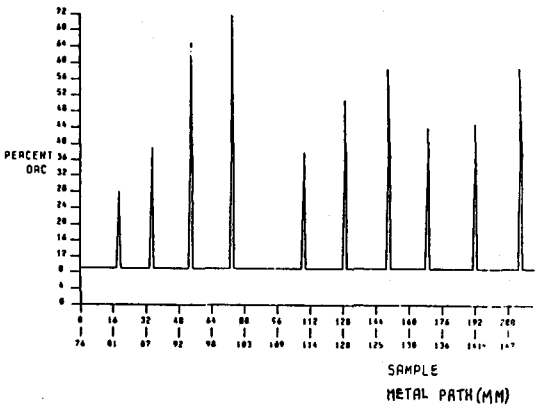


Fig. 16 RPV stud 2.7mm notch signals by window.

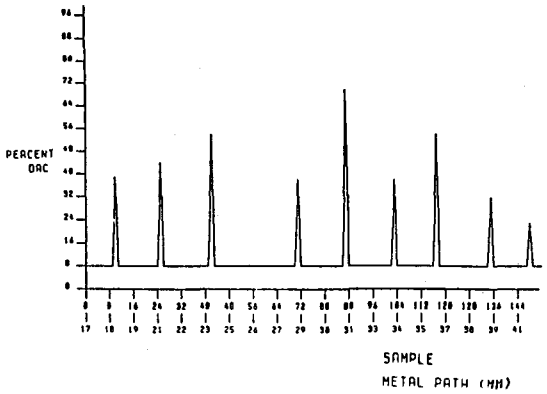


Fig. 17 RCP stud 1mm notch signals by window.

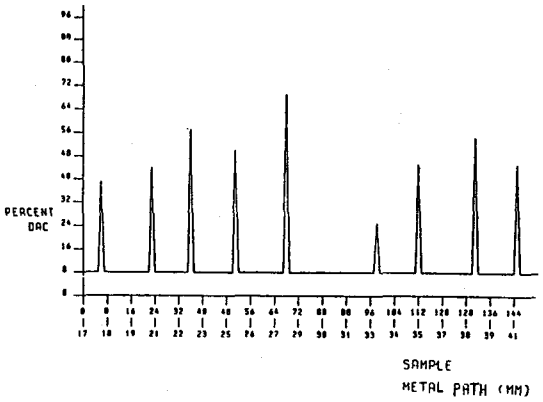


Fig. 18 RCP stud 1.5mm notch signals by window.

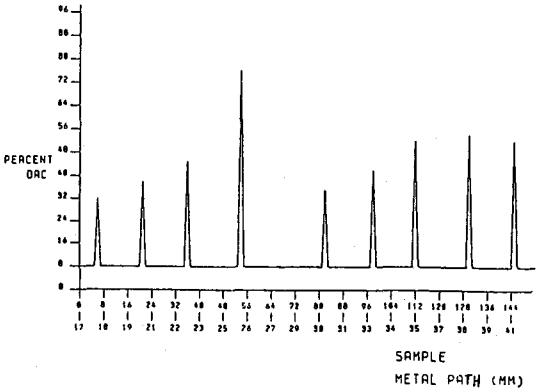


Fig. 19 RCP stud 2mm notch signals by window.

$$Tdd = Td - Tdn \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

Table 4는 이론적으로 계산된 Tdd이다.

수집된 data 에서 Tdd를 구해 결함의 크기(Ns)를 계산해 보면

$$Ns = (\cos\theta \times Tdd/2) \times V \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

(V : longitudinal or shear wave velocity in steel)

이다. 실제로 RPV, RCP stud bolt로 부터 수집된 data에 결함크기 Ns를 구해 보면 Fig. 20, 21, 22, 23과 같은데 1-2mm 크기의 미세한 결함까지 검출이 가능하다.

Table 4 Td and Tdd of stud bolt

STUD	NOTCH(MM)	Td(u sec)	Tdd(u sec)
RPV	NO INDICATION	1.54	0
	1	2.21	0.67
	2	2.87	1.34
	2.7	3.35	1.81
	4	4.21	2.67
	6	5.54	4.02
RCP	NO INDICATION	1.15	0
	1	1.82	0.67
	1.5	2.15	1
	2	2.48	1.33
	3	3.15	2
	4	3.82	2.67
	5	4.48	3.33

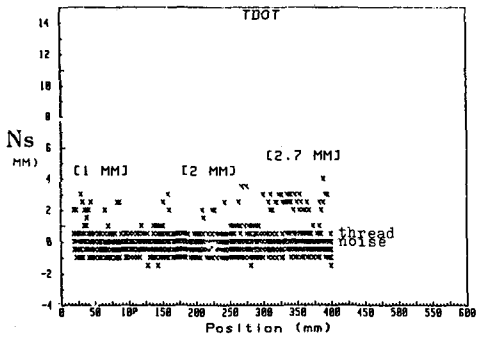


Fig. 20 RPV stud indications(1, 2, 2.7mm notch) by TDOT.

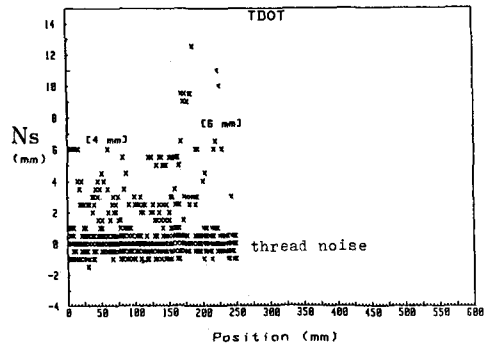


Fig. 21 RPV stud indications(4.6mm notch) by TDOT.

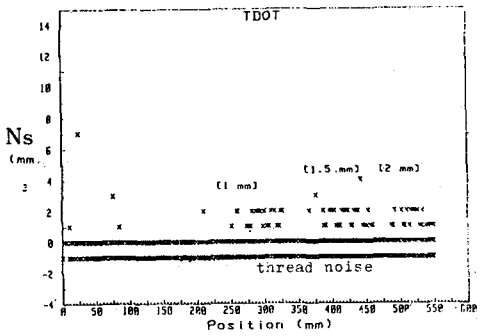


Fig. 22 RCP stud indications(1, 1.5, 2mm notch) by TDOT.

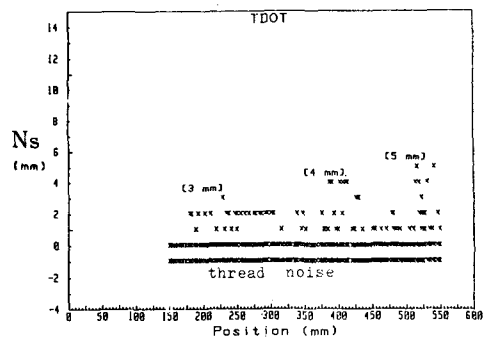


Fig. 23 RCP stud indications(3, 4, 5mm notch) by TDOT.

3-2 고 찰

현재 ASME Code Section V Article 4 및 5에서 채택하고 있는 DAC 방법과 연구된 초음파 전달시간(TOF)을 이용한 TDTS 방법을 비교하면 DAC 방법과 AR 방법은 2-3mm 이상의 결함은 잡음신호와 3-4dB 이상 차이가 나서 결함 검출이 용이하지만 2-3 mm 이하의 미세한 크기의 결함은 검출하기가 어렵다. 그러나 TDTS 방법은 2-3mm 이하의 미세한 결함까지 검출이 가능하며, 결함의 크기에 관계없이 결함과 잡음신호가 분별이 가능하다.(Table 5)

Table 5 Results of DAC, AR, TDOT

STUD	TECHNIQUE	NOTCH DEPTH(㎜)					
RPV		1	2	2.7	4	5	
	DAC	X	X	0	0	0	
	AR	X	X	0	0	0	
	TDOT	0	0	0	0	0	
RCP		1	1.5	2	3	4	5
	DAC	X	X	0	0	0	0
	AR	X	X	0	0	0	0
	TDOT	0	0	0	0	0	0

(* X:부적합, 0:적합)

그러나 TDTS 방법의 적용은 검사를 자동화 했을 때 유리하며, 잡음 신호와 결함신호를 구분하기 어렵기 때문에 Signal－conditioning이 선행되어야 한다. 또한 1－2mm 결함 크기 측정시 실제 결함 크기보다 조금 과대평가 되었는데, 그 이유는 실제 결함크기(1－2 mm)와 사용하고 있는 초음파 주파수(2.25MHz)의 파장(1.4 mm)이 비슷하기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 알 수 있듯이 TDTS 방법은 1－2 mm의 결함을 나사산 신호와 구분이 가능하며 2－3mm 이상의 결함 검출에도 우수하였다.

4. 결 론

Stud bolt의 나사산에 존재하는 corrosion wastage(loss of bolt diameter)나 stress corrosion cracking을 본 연구에서 개발된 signal－conditioning을 거친 나사산에서의 초음파의 진행시간차(Time Difference of Thread Signals－TDTS)를 이용해 1－2mm 크기의 미세한 결함도 쉽게 검출할 수 있었다.

References

1. NRC Bulletin ssins No. : 6820, OMB No. : 3150－0086 "Degradation of Threaded Fasteners in the Reactor Coolant Pressure Boundary of PWR Plants" June 2, 1982.
2. NRC Bulletin ssins No : 6835, Accession No. : 8202040130, In 82－06 "Failure of Steam Generator Primary Side Manay Closure Studs", March 12, 1982.
3. NRC Bulletin ssins No. : 6835, Accession No. : 8005050068, In 80－27 "Degradation of Reactor Coolant Pumps Studs", June 11, 1980.
4. NRC Bulletin No. 89－02 OMB No. : 3150－0011 "Stress Corrossion Cracking of high - hardness type 410 Stainless Steel internal preloaded Bolting in anchor darling model S350W swing check valves or valves of similar design", July 19, 1989.
5. Assessment of bolting examination requirements and practices, EPRI NP－4274 project 2179－5 Final Report, October 1985.
6. "Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Component", Sec. XI of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, the American Society of Mechanical Engineers, New York(86) pp. 65－66, 92－113.
7. G. M. Light "Ultrasonic Detection of Stress－corrosion Cracks in Reactor Pressure Vessel and Primary Coolant System Anchor Studs(Bolts)" Materials Evaluation, Dec. 1987, pp. 1413－1418.
8. B. Baligand, M. Grozellier, and D. Romy, "Improvement in Ultrasonic Examination of Austenitic Steels", Materials Evaluation, 44, April 1986, pp. 577－581.
9. J. Wolf, T. H. Neighbors and W. G. Mayer, "Optical probing of Ultrasonic Pulses", Ultrasonics, 1989, Vol. 27 May pp. 150－154.
10. D. M. Suh, "Development of Automatic Ultrasonic Testing Equipment for Pressure－retaining Studs and Bolts in Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 9, No. 1, 1989, pp. 106－110.
11. ADAS Operation Manual, SWRI, Mar. 1985 pp. 25－100.
12. 가동중 검사 절차서, 1987, KAERI－NDT－500－12