

원자력 압력용기의 피복하부 결함검출에 대한 고찰

박 치 승* · 안 희 성** · 박 종 현* · 박 광 희*

A Study of the Detection for Underclad Cracks of Nuclear Pressure Vessel

C. S. Park, H. S. Ahn and J. H. Park, K. H. Park

Abstract It has not been performed to inspect the underclad cracking in Korea nuclear plant since there is no Code Requirements for inspection. However, underclad cracks in nuclear pressure vessels were reported firstly in 1970. The objection of this study is to be established the ultrasonic inspection techniques for underclad cracking. The ultrasonic inspection of bimetalic stainless steel weld is very difficult by high attenuation and multiple scattering at weld surface and weld/base metal interface. The various inspection methods using 70°refracted longitudinal wave, 50/70 tandem transducer, 45° and 60°single shear wave are compared. Experiments on limited specimens applied same condition to nuclear pressure vessels shows that 70°refracted longitudinal wave method is the best one for the detection of underclad cracks. 50/70 tandem transducer using SPOT(Satellite Pulse Observation Technique) is more effective for underclad crack sizing than other sizing methods.

1. 서 론

원자력발전소의 핵 증기 공급 계통(Nuclear Steam Supply System) 주요 부품 및 계통에 대하여 각 부품의 제작, 건설시와 가동중에 정기적으로 건전성 여부와 안전성을 확보하고자 가동전 검사(Preservice Inspection)와 가동중 검사(Inservice Inspection)를 수행하고 있다. 원자력발전소의 가동전·중 검사(PSI/ISI)는 10 CFR 50.55a¹⁾ 및 최종 안전성 분석보고서(FSAR)의 요구사항에 따라서 압력 부위의 용접부에 대해서만

비파괴 검사를 수행하도록 되어 있고, 그 이외의 부위에 대해서는 부품을 제조한 국가의 제반 관련규격을 적용하여 검사를 수행하고 있다. 따라서 원자로의 피복하부 결함에 대한 비파괴 검사는 현재까지는 ASME Code에는 언급되어 있지 않아 이에 대한 검사는 국내에서는 수행되고 있지 않은 상태이다. 그러나 원자로 압력 용기의 경우 발전소의 가동중에 끊임없는 가압 열충격(Pressurized Thermal Shock : PTS)으로 인하여 피복하부에 결함이 존재할 경우(최소 깊이 6mm) 원자로의 파손을 초래할 수 있다고 Gamble과 Strosni-

* 한국에너지연구소 비파괴시험연구실

** 원자력안전센터 품질보증실

접수 : 1989년 9월 30일

der 등에 의해 제기되었다.^{2,3,4)} 이에 따라 미국의 Nuclear Regulatory Commission(NRC)는 원자로의 피복하부에 존재하는 결합의 중요성을 인식하여 1981년 6월에 U. S. Reg. Guide 1.150⁵⁾을 통하여 피복하부 결합 검출에 대하여 언급하고 있으나, 피복하부 결합에 대한 검출방법의 어려움으로 인하여 실제적으로 중요성은 인식하면서도 구체적인 검사 방법, 검사 주기 등에 대하여서는 정의되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 피복하부 결합검출에 대한 비파괴 검사의 국내외 기술현황을 조사하여 가장 적절한 검사 방법 및 평가방법을 찾고자 하였다.

2. 본 론

2-1. 피복하부 결합의 정의 및 특성

피복하부 결합은 피복 용접부 하부모재의 열영향부인 결정립 조대 지역에서 발생하는 것으로서, 크기는 약 깊이 3mm, 길이 3mm 이상의 입계 결합(Fig. 1)⁶⁾으로 정의되나, 결정입계의 비결합성 결합으로 그 미만의 결합도 피복하부 결합으로 간주하기도 한다. 결합의 특성은

- 피복 용접시 열영향부에서 나타나나 열영향부 전 구역에 존재하지 않고 용접으로 두차례 가열을 받는 접침 부위로 초층으로 1200~1425°C의 열을 받으며, 둘째층으로 600~700°C의 열을 받는 부위이다. 전형적인 모양과 위치는 Fig. 1, 2와 같다.
- 결합의 크기는 깊이, 길이, 공히 0.2mm에서 최대길이 13mm, 깊이 8mm⁷⁾로써 prior austenite grain boundary의 결정입계를 따라 발달(Fig. 1)하는데 방향은 피복재 표면과 수직이며 용접 방향과 45°-90°사이의 방향성을 가진다.
- 용가재를 스트립이나 6개의 전극봉을 사용한 고입열 잠호 아크 용접시에 많이 발생하며 재질은 SA 508, CL. 2 forging이나 plate재에 많다.
- 결합은 피복용접부 하부에 위치하고 비교적 작으므로 육안 및 비파괴 시험으로 발견이 어려우며, 따라서 피복 용접부를 제거, 연마후 100배의 확대로써 쉽게 관찰된다. 액체 침투탐상으로 발견이 되기도 하나, 간혹 면 굽힘시험없이는 검출이 어렵다. 결합의 정확한 발생기구는 재가열 혹은 응력 완화

균열, 수소 혹은 저온 균열 및 액화균열 등 3가지의 기구로 나뉜다.^{8,9)}

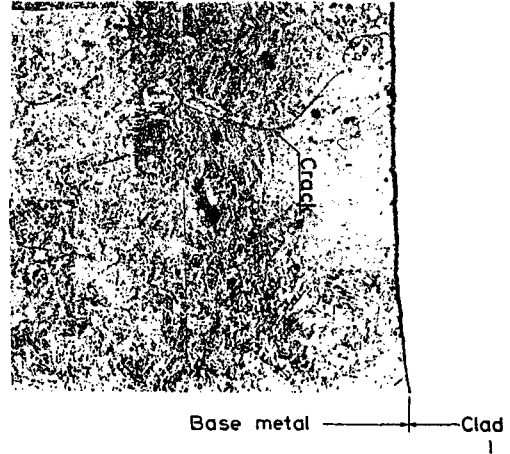


Fig. 1 Nature of underclad crack.⁶⁾

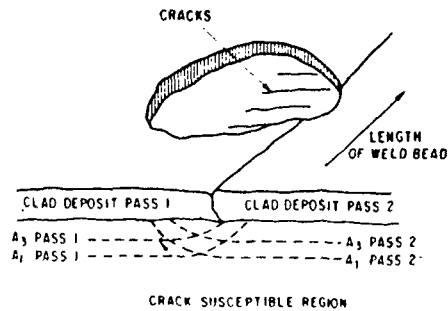


Fig. 2 Section of clad plate showing cracks.⁶⁾

2-2. 피복하부 결합에 대한 비파괴검사기술

일반적인 용접부 및 모재 내부에 존재하는 균열 등 미세 결합을 검출하는데 있어 초음파 탐상이 가장 널리 이용되고 있으나, 이종 금속(carbon/stainless) 접합 부위, 특히 원자로의 피복하부의 결합검출은 결합 발생 예상 지역(피복재 표면에서 약 8~10mm 정도)이 초음파 특성상 근거리 음장(near field)내에 속해 있고 더구나 피복재가 austenite stainless steel로써 감쇄가 심할뿐만 아니라 표면 거칠기로 인한 초음파 에너지의

다중 산란으로 정확한 검출과 평가분석이 어려운 실정이다. 따라서 각국에서 이러한 피복하부 결함을 검출하기 위한 검사기술을 개발하고 있는데, 그 검사기술은 70°굴절종파를 이용하는 방법(Fig. 3)⁴⁾과

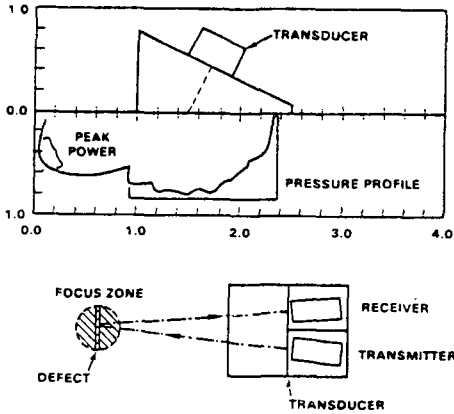


Fig. 3 Configuration of transducer for underclad crack detection.⁴⁾

PATT¹⁰⁾ 방법과 STOP^{11, 12)} 방법을 혼합하여 개발한 SLIC(Shear and Longitudinal waves to Inspection material for Cracks) 탐촉자를 이용하여 검사 하는 MOST (Multiple Observation Sizing Technique)^{13, 14)} 방법 (Fig. 4) 및 Focused Immersion Method¹⁵⁾(Fig. 5) 등이 있다.

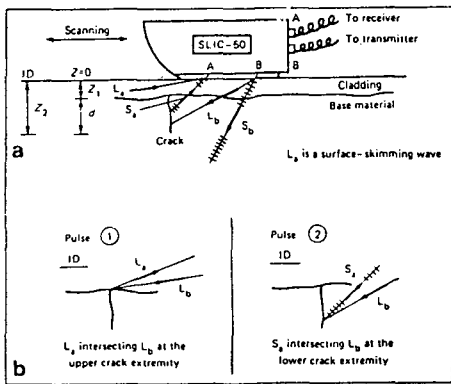


Fig. 4 Interaction of the transmitted high angle longitudinal wave(Lb) of the SLIC-50 with an underclad crack.¹³⁾

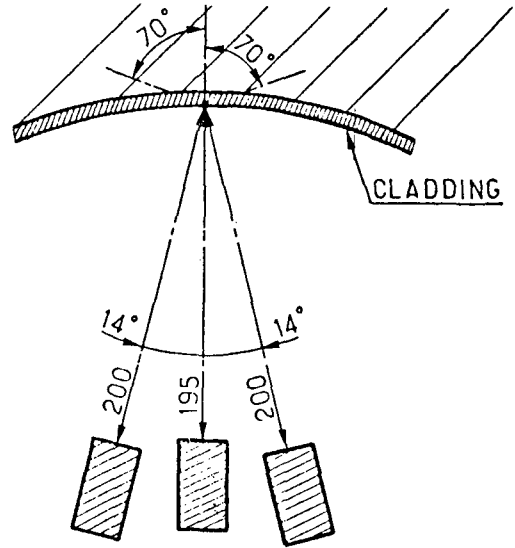


Fig. 5 Schematic illustration of the focused immersion method.¹⁵⁾

2-3. 실험 절차 및 방법

2-3-1. 재료

본 실험에 사용된 재료는 SA 508, CL. 3 단조재료 영광 3, 4호기 원자로, 가압기, 증기발생기 등 주요 압력 용기에 사용되며 한국중공업에서 용해, 단조한 것이다. 모재의 화학조성 및 각종 기계적 성질은 Table 1 과 같다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of SA 508, CL. 3

Composition		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Spec.	Heat	<0.25	<0.12	1.20/1.50	<0.025	<0.025	0.40/1.00	<0.25	0.45/0.60	<0.05	-	-
	Product	<0.25	<0.12	1.11/1.59	<0.025	<0.025	0.37/1.03	<0.31	0.37/0.68	<0.06	-	-
Result Top0 1/4t	Heat	0.18	0.3	1.46	0.004	0.003	0.92	0.21	0.54	0.003	0.003	0.045
	Product	0.18	0.3	1.41	0.005	0.003	0.95	0.22	0.56	0.003	<0.003	0.050

(wt. %)

Mech Test	YS:0.2% (Mpa)	T.S(Mpa)	EL(%)	RA(%)	IMPACT +45C (Joule)	Upper Shell (Joule)	FATT (C)	RTNDT (C)
Spec.	>345	550/725	>180	>380	Ave. >41. Min. >34	>104	-	<-122
Result	445	583	282	72.7	Ave. 180. Min. 160	245	-	-30

2-3-2. 인공 결함 삽입

인공 결함은 notch를 폭 0.2mm의 방전가공으로 깊이 6, 8, 10, 12mm의 4종류와 MTS를 이용하여 3점 굽힘 시험으로 피로 균열을 4mm, 6mm, 9mm, 10mm의 4종류로 만든후 한국중공업에서 실제 압력 용기에 행하는 잠호 아크용접 방법과 동일한 조건으로 피복 용접을 수행하였으며 이 용접조건은 Table 2와 같다. 또한 flux로써는 Soudometal사의 INT 101을 사용하였으며, flux의 화학 조성 및 염기도의 자세한 정보가 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Submerged arc welding condition

Filler Metal Size	Strip(60×0.5 mm)
Filler F-No	6
A-No	8
SFA No	5.9
Current Type	DC
Current	/650 A
Voltage	/27 V
Welding Speed	1.8 mm/sec
Pollitirity	RP
Weaving	Stringer
Over lap	8 mm
Stick-out Length	30 mm
Pre-heat Temp.	121 °C
Post-heat Temp.	621°C, 40.5시간
Interpass Temp.	170°C

Table 3. Flux information

INT 101	(Wt, 0)
SiO ₂	30%
CaO	
MgO	
BaO	28%
K ₂ O	
Na ₂ O	
Al ₂ O ₃	
TiO ₂	30%
FeO	
MnO	3%
F	6%
Cr	3%

2-3-3. 피복용접후의 최종 인공 결함의 깊이 측정

잠호 아크 피복 용접후 최종적으로 모재에 잔존하고 있는 인공 결함의 깊이를 방사선 투과시험과 액체 침투 탐상을 수행하여 측정하였다. 방사선 투과 선원은 Co-60를 사용하였으며 투과시험의 제반조건은 Table 4와 같다.

Table 4. Radiographic Testing condition

Specimen Thickness	56mm
Source to Film Distance(SFD)	100 cm
Exposure Time	11 min
Source Strength	Co-60, 25 Ci
Screen (Pb)	Front : 0.05mm Back : 0.1mm
Film	Kodak AX-5

2-3-4. 초음파탐상시험

본 연구에서 사용된 초음파 탐촉자는 일반적인 용접부 검사에 쓰이는 45°, 60°single shear wave와 피복하부 결함 검출을 위해 고안된 70°굴절 종파 및 SLIC-40를 사용하였고, 이에 더하여 당 실에서 제작한 50/70 tandem 탐촉자를 사용하여 이들 방법들과 상호 비교하였다. 실험에 사용된 장비 및 시험편의 조건은 다음과 같다.

- a) 시험편의 표면조건
 - Ground Condition
 - Unground Condition
- b) 사용 장비
 - Sonic Mark I
 - USK - 7
 - Matec Gating Modulator Model 5400
 - Le Croy 9400 Digital Oscilloscope
- c) 보정 시험편
 - Carbon and Stainless Steel
 - Notch Depth : 2.5, 5, 10, 15mm

2-4. 결과 및 고찰

피복 용접후 남아 있는 최종 인공결함 깊이를 알아보기 위하여 수행한 방사선투과시험 및 액체침투 탐상 결과로 방전 가공한 notch 깊이는 5, 6, 9, 11

mm이고 피로 균열은 3, 4, 7, 9mm로 평가되었다.

2-4-1. 결함감지능력(Flaw Detectability)

결함의 감지능력을 알아보기 위하여 앞서 언급한 탐촉자를 가지고 as-weld 및 연마한 피복면에 대하여 실험을 수행, 평가하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 70° 굴절종파(70°R.L) 탐촉자로 최대 신호치를 얻었을 때 기준 감도로 고정한 후(68 dB), 당실에서 제작한 50/70 tandem 탐촉자 및 SwRI 50/70 tandem 탐촉자를 비교한 결과 70°R.L 탐촉자가 50/70 tandem 탐촉자보다 약 13~18 dB 정도 더 sensitive함을 알 수가 있

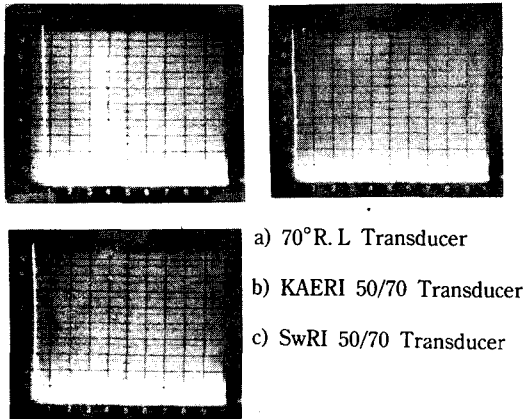
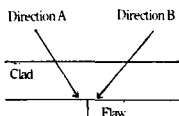


Fig. 6 Flaw detectabilities of each transducers.

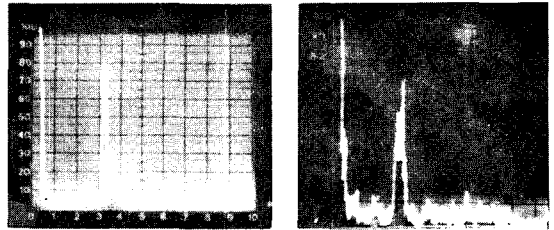
었다. 이는 70°R.L 탐촉자의 경우 피복하부결함 발생 예상 지역에 초음파의 focal zone을 설정하였기 때문이라 생각된다. 또한 주사방향에 따른 신호의 변화를 알아보기 위해 주사 방향을 180°회전시켜 같은 notch에 대해 실험을 수행한 결과 주사 방향이 바뀔에 따라 70°R.L 탐촉자의 경우 약 3~6 dB, 50/70 tandem 탐촉자의 경우 약 3~8 dB의 편차가 있음을 알 수 있었다(Table 5).

Table 5. Amplitude variation by scanning direction

No.	Depth	초음파 Amplitude		Transducer
		Direction A	Direction B	
1	5mm	69 dB	63 dB	70°R.L.
		79 dB	76 dB	50/70 Tandem
2	6mm	70 dB	67 dB	70°R.L.
		78 dB	73 dB	50/70 Tandem
3	9mm	71 dB	68 dB	70°R.L.
		81 dB	73 dB	50/70 Tandem
4	11mm	71 dB	67 dB	70°R.L.
		81 dB	73 dB	50/70 Tandem



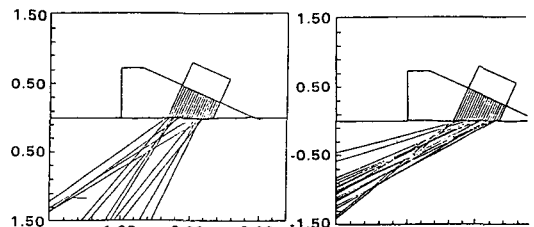
이는 용접부/모재 계면의 불규칙성에 기인한 것이라 사료된다. 검사체의 표면 상태가 초음파의 신호에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 as-weld 상태와 연마한 후에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 연마한 피복면의 경우, 신호는 거의 noise가 없는 상태였으나 as-welded 상태의 경우 어느 정도의



a) Ground Condition b) As-Welded Condition

Fig. 7 Comparison of noise level in different surface conditions.

noise가 관찰되었고 amplitude 또한 약 7~8 dB 낮게 관찰되었다. 그러나 이들 시험편의 경우는 60mm 상태라 하더라도 표면은 상당히 양호한 편이어서 noise가 작게 발생되었다고 사료되며 만약 single wire cladding을 하였다면 signal to noise 비는 상당히 낮아지리라고 예견된다. Fig. 8은 표면 거칠기가 초음파 신호에 미치는 영향을 설명하기 위해 표면 거칠기가 0.012 in. RMS의 용접 상태 시험편과 0.0016 in. RMS의 수동 연마한 시험편의 초음파 진행 양상을 각 부위별로 Snell's Law를 적용하여 초음파 진행 방향을 computer program으로 plotting한 것이다.⁴⁾



a) 0.012in RMS

b) 0.0016in RMS

Fig. 8 Schematic illustration of surface roughness effect by computer plotting.⁴⁾

물론 이 data를 이용하여 어떤 이론적인 모델을 설정할 수는 없으나 초음파 산란 양상을 이해하는데 상당한 도움을 주리라 사료된다. 따라서 동일한 탐촉자로 검사를 수행할 경우, 실제 검사체와 보정시험편의 표면 상태뿐만 아니라 피복 용접 방법(예를 들면 Strip clad, 6 wire 혹은 single wire cladding)에 따라 검사 결과에 영향을 미치므로 이 점에 주의하여야 한다고 사료된다.

2-4-2. 결함 크기 측정

결함 크기 측정의 기본 원리는 Satellite pulse observation technique(SPOT)를 이용한 것으로 탐촉자를 결함에 대하여 전후로 움직여 적당한 감도를 가진 2개의 신호(결함 양 끝단에서 발생된 회절파)를 CRT에 동시에 나타내어 이들 신호의 탐촉자에 도달 시간차(Δt)를 해석하여 결함 크기를 측정하는 방법으로 이들 시간차(Δt)와 결함 크기 D1은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\Delta t = (2 D1 \times \cos \beta) / C$$

여기서 C : 초음파의 속도, β : 굴절각

이때 균열성 결함 크기의 측정 요령으로 보정 시험편에 깊이가 다른 여러개의 notch를 가공하여 각각의 notch에서 나오는 신호들의 시간차를 CRT 화면의 screen division(SD)으로 나타내어 notch 깊이와 SD와의 관계를 구하므로써 임의의 결함 높이를 CRT에서 바로 판독할 수 있다. 따라서 본 실험에서 결함 크기를 측정하기 위해 notch 깊이가 2.5, 5, 10, 15mm인 보정 시험편에서 notch의 윗 끝단에서 나오는 신호와 아래 끝단에서 나오는 신호의 screen division 차를 기준으로 하여 time base calibration을 한다. Fig. 9는 보정시험편에 대해 수동 검사한 신호의 양상을 나타낸 것이다. Notch 양 끝단에서 반사되어 나온 신호의 screen division, SD의 차는 notch의 깊이, Dn과 직선적인 관계가 있다.³⁾ 보정 시험편에서 반사되어 나온 신호의 data를 가지고 이들 사이의 관계식을 구하면 다음과 같다.

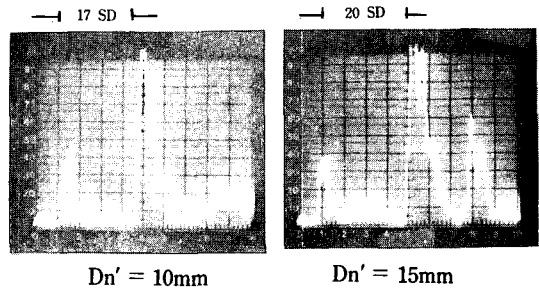
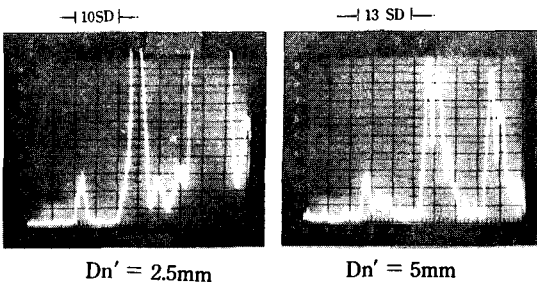


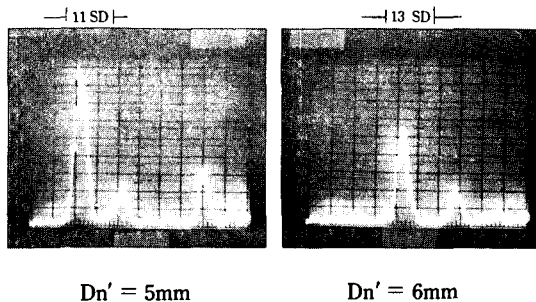
Fig. 9 Relationship between notch depth and doublet separation by 50/70 tandem transducer from the claded side.

$$SD = 8.61 + 0.786 Dn$$

이 관계식을 이용하여 underclad notch 및 fatigue crack에서 얻은 신호치(Fig. 10, 11)를 평가하여 보면 Table 6과 같다. 이 결과를 놓고 볼 때 MOST 방법으로 결함의 크기 측정을 수행하였을 경우, Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 결함 크기 평가가 약 10~15%의 오차 범위내에 있음을 알 수 있어, 결함 크기 평가 방법으로 적절한 방법이라고 사료된다.

Table 6. Estimated results of underclad notch

No.	Notch Depth Dn'(mm)	Measured SD	Calculated SD'	Measured Dn'(mm)	Deviation		
					SD-SD'	Dn-Dn'	%
1	5	11	12.57	3.125	-1.57	-1.875	-37.5
2	6	13	13.33	5.625	-0.33	-0.375	-6.25
3	9	16	15.69	9.375	+0.31	+0.375	+4.2
4	11	18	17.26	11.875	+0.74	+0.875	+7.95



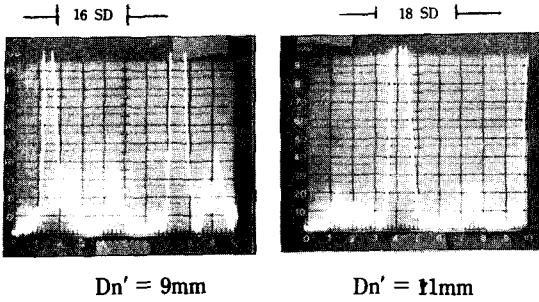


Fig. 10 Relationship between underclad notch depth and doublet separation by 50/70 tandem transducer from claded side.

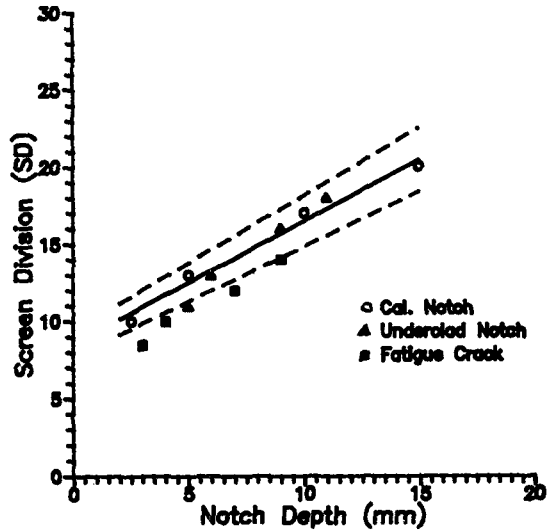


Fig. 12 Ninety percent confidence limits of defects depth estimates.

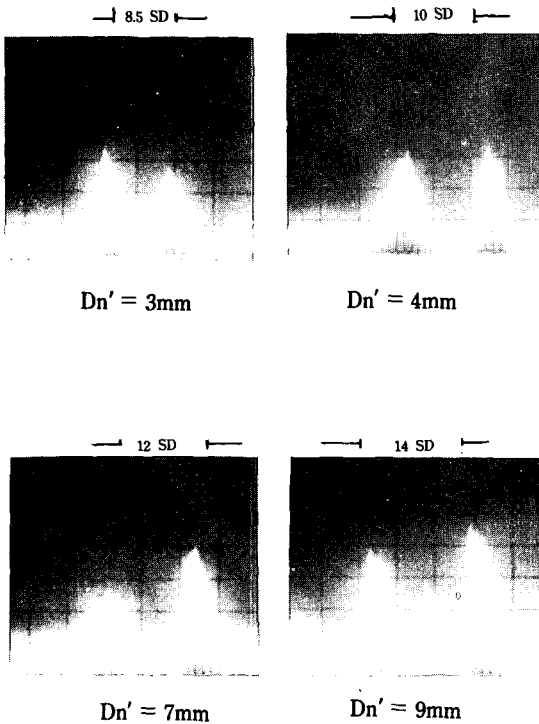


Fig. 11 Relationship between fatigue crack depth and doublet separation by 50/70 tandem transducer from claded side.

3. 결 론

이상과 같이 SA 508, CL. 3 강에 309 L 피복 용접을 한 시험편의 피복하부 결함에 대한 실험 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 피복면과 용접부/모재 계면의 거칠기가 underclad notch를 감지하는데 상당한 영향을 미치므로 검사체의 용접 방법 및 표면 거칠기와 보정 시험편의 그것에 유의하여 검사를 수행하여야 한다.
- 2) 피복하부에 생성되었을지도 모르는 결함의 검출은 70°굴절 종파 탐촉자로 검사를 수행하고 검출된 결함에 대한 크기 측정은 50/70 tandem 탐촉자로 수행하는 것이 좋다.
- 3) 결함의 크기 측정은 underclad notches를 이용하여 결함의 양 끝(端)에서 나오는 신호의 screen division 차를 이용하여 평가하는 것이 좋다.
- 4) screen division 차와 notch depth와는 직선적인 관계가 있으며, 이들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$SD = 8.61 + 0.786 Dn$$

References

1. 10 CFR 50.55a "Codes and Standards", 1983.
2. E. Smith, "The Effect of Austenite Cladding on the Extension of an Underclad Crack into the Wall of a Water-cooled Reactor PV Vessel during a Hypothetical LOCA", SMIRT-7, Tran., 7th Int. Conf. Chicago, Aug. 1983.
3. R. M. Gamble and J. Strosnider Jr., "An Assessment of the Failure Rate for the Beltline Region of PWR Pressure Vessels during Normal Operation and Certain Transient Conditions" NUREG-0778, June 1981.
4. T. T. Taylor, S. L. Crawford, S. R. Doctor, and G. J. Osakony, "Detection of Small Sized near Surface Underclad Cracks for Reactor Pressure Vessels" NUREG/CR-2878, PNL-4373.
5. U. S. Nuclear Regulatory Commission Reg. Guide 1.150 "Ultrasonic Testing of Reactor Vessel Welds during Preservice and Inservice Examination" Revision 1. Feb. 1983.
6. Kume, R., et al., "Internal Stresses in Thick Plates Weld-overlay with Austenitic Steel" Trans. of JWS, Vol. 5, No. 1, April 1974.
7. Druce, S. G. and Hudson, J. S. "Defects Arising from Welding and Cladding PWR Pressure Vessel Steels-A Review, UK Atomic Authority AERER 10418, Feb. 1982.
8. Frederick, G., et al., "Underclad Cracking in PWR Vessels" Translation CE7892, Paper 20, AIM Meeting, Belgigue, 1981.
9. Enrietto, J. F., "Underclad Cracks-Their Nature, Detection and Consequences. Performance of Pressure Vessels with Clad and Overlaid Stainless Steel Linings" Proceedings Conf., Denver, June 21-25 1981.
10. M. Kishgami, Guidline for the Measurement of Defect Height by Tip Echo Method in Steel Weldment, 일본 비파괴 검사 제 34 권 제 1 호, 1985, pp 22~28.
11. G. J. Gruber, G. J. Hendrix, and W. R. Schick, "Characterization of Flaws in Piping Welds Using Satellite Pulse", Material Evaluation. vol. 42, April, 1986, pp 426~432.
12. 광경진 외, Satellite Pulse Technique(SPT)를 이용한 결함의 크기 측정, 비파괴 검사, 제 1 권, 제 1 호, 1981, pp 6~12.
13. G. J. Gruber, D. R. Hamlim, H. L. Grothnes, and J. L. Jackson, "Imaging of Fatigue Cracks in Claded Pressure Vessels with the SLIC-50", NDT International, vol. 19, No. 3, 1986, pp 155~161.
14. G. J. Gruber and A. G. Temple, "Modeling the Performance of SLIC-40 and SLIC-50 Multibeam Tranceducers", in Proceedings of the 4th European Conf. on NDT, London, England, Sep. 13-18, 1987.
15. B. Verger and R. Saglio, "Nozzle Inservice Inspection Detection and Characterization of Undercladding Cracks" in Proceedings of the 5th International Conf. on NDT Evaluation in the Nuclear Industry, San Diago, May 10-13, 1982.