

## 원자력 압력용기의 피복하부 결함검출에 대한 고찰(II)

박 치 승 · 강 기 원

한국원자력연구소 비파괴시험사업부  
(1993. 3. 20 접수)

요 약 국내 원자력 압력 용기의 피복하부 결함에 대한 검사는 1970년대 초부터 이 피복하부 결함에 대한 보고가 되기 시작하였으나 적용 규격인 ASME Code의 요구사항이 아니므로 현재까지는 검사를 수행해 오지 않고 있다. 본 실험의 목적은 이러한 피복하부 결함을 검출하는데 적절한 초음파검사 방법의 조건을 찾는 것이다. 실험은 70°굴절종파, 50/70 multibeam탐촉자, SLIC-50 탐촉자 등을 사용하여 원자력 압력용기의 피복용접과 같은 조건하에서 피복용접 시킨 초음파보정 시험편과 demonstration시험편에 대하여 수행하였다. 실험 결과 피복하부 결함의 검출은 50/70 multibeam탐촉자가 효과적 이었으며, 피복하부 결함의 길이 평가는 70°굴절종파로 수행하는 것이 바람직한 것으로 나타났으며, 반면에 피복하부 결함의 깊이 측정은 SLIC-50 탐촉자를 사용하여 M-SPOT 방법과 M-PET 방법으로 평가하는 것이 가장 효과적인 것으로 사료된다.

### 1. 서 론

원자력발전소의 건전성 여부와 안전성을 확보하고자 수행하는 가동전·중 검사(PSI/ISI)는 10 CFR 50.55a<sup>(1)</sup> 및 최종 안전성분석 보고서(FSAR)의 요구사항에 따라서 비파괴 검사를 수행하고 있으며 원자로의 피복하부 결함에 대한 검사는 적용규격인 ASME Code에서는 언급되지 않고 있는 상태이다. 그러나 1970년대 이후부터 이 피복하부 결함에 대한 연구가 진행되어 Gamble과 Stro-snider<sup>(2,3)</sup> 등에 의해 원자로의 경우 발전소가동중 끊임없는 가압 열충격에 의해 원자로의 파손(최소 깊이 6mm)을 초래할 수 있다고 문제를 제기 하였다. 이에 이 결함의 중요성을 인식하여 US Reg. Guide 1.43 을

통해 피복 용접을 관리하게 되었고, Reg. Guide 1.150<sup>(4)</sup>을 통해 검사를 요구하게 이르렀지만 정확한 결함 측정 방법 등의 구체적 사항에 대하여서는 언급이 없었다. 그러나 ASME Sec. XI 1989년판 winter addenda를 통해 공식적인 피복하부 결함 검사를 위한 qualification requirement가 나오므로써 ASME Code에서도 피복하부 결함 검사를 요구하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 이 결함의 비파괴 검사법에 대한 국내외 기술현황<sup>(5,6,7,8)</sup> 파악과 prescreening block 및 demonstration block 을 제작하여 가압 열충격 형태의 피복하부 결함 검출 및 크기 측정을 위한 비파괴 검사법을 확립함에 있어서 관련 Code의 검사법이 적용될 경우 Code의 요구사항을 만족

하는 검사가 가능하게 만드는 것에 그 목적이 있다.

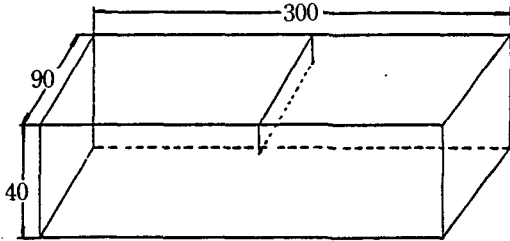
2. 실험 방법 및 절차

2.1. Test block 제작

2.1.1. Prescreening block 제작

Underclad crack검출 및 크기측정을 위한 test parameter를 설정하기 위해 제작된

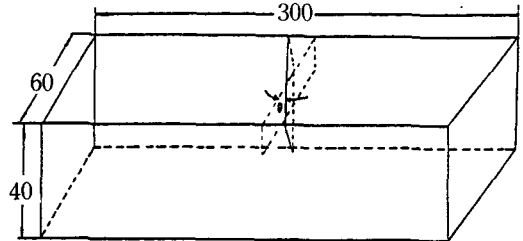
prescreening block은 Fig. 1, 2, 3과 같이 3가지 형태로 분류, 폭 0.2mm로 방전가공하여 제작하였다. 또한 DAC를 이용하여 결함의 깊이를 측정하기 위하여 직경1/16 inch의 side drilled holes를 Fig. 4와 같이 방전가공하였다. 그후 피복용접은 실제 압력용기에 행하는 잠호 아크 용접방법과 동일한 조건으로 피복용접을 수행하였다. 시험편의 모재 및 피복재의 화학적 조성은 Table 1과 같다.



unit : mm

- notch depth : 3, 5, 7, 11, 13mm
- notch angle : 90°

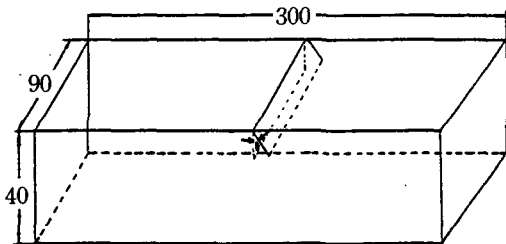
Fig. 1. Dimension and configuration of A-type prescreening block



unit : mm

- notch depth : 7, 13mm
- notch angle to welding direction : 5, 10, 15, 30, 45 degree

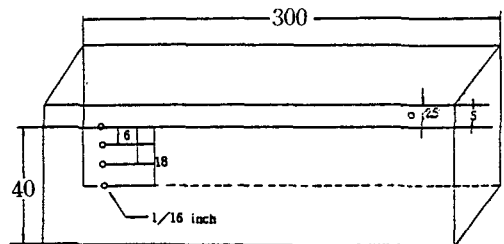
Fig. 3. Dimension and configuration of C-type prescreening block



unit : mm

- notch depth : 3, 7, 11mm
- notch angle to cladding surface : 5, 10, 15, 30 degree

Fig. 2. Dimension and configuration of B-type prescreening block



unit : mm  
tolerance : ±1/64 inch

Fig. 4. Dimension and configuration of prescreening construction block for DAC

Table 1. Chemical composition of base and clad materials.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Base Material	0.18	0.30	1.41	0.005	0.003	0.95	0.22	0.56	0.003
309 L Stainless Steel	0.012	0.37	1.64	0.013	0.001	13.12	23.86	0.15	0.061

2.1.2. Demonstration block 제작

Underclad crack 검출을 위한 초음파 탐상 실험을 재현성과 정확성을 기하기 위해 actual flaw를 삽입한 시험편을 사용하여 초음파 탐상 실험을 수행하는 방법이 요구되며, 이러한 시험편을 사용하여 performance demonstration을 수행하도록 요구하고 있다. 실제 unknown결합의 data 수집과 평가를 수행할 block의 설계와 제작은 다음과 같이 수행하였다.

가) Block의 설계

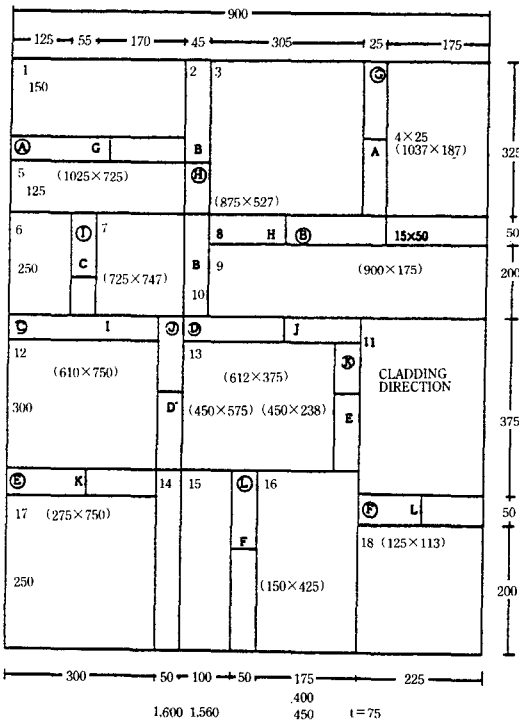


Fig. 5. Lay-out drawing of demonstration block

Table 2. Crack depth and length of demonstration block (단위 : mm)

균열	방 향	깊이	길이	깊이/길이 비
A	Cladding	5	25.3	0.198
B	방향에 수직	10	44.9	0.223
C		14.6	54.9	0.266
D		18	50	0.36
E		11.2	25	0.448
F		14	49.9	0.281

균열	방 향	깊이	길이	깊이/길이 비
G	Cladding	13	49.8	0.261
H	방향에 평행	15	50	0.30
I		7	20.2	0.347
J		3.5	24.8	0.141
K		18	50	0.36
L		10.1	49.9	0.202

Fig. 5는 피로 균열 시험편을 block에 삽입하기 위한 도면으로서 총 12개의 균열 시험편과 18개의 모재로 구성되며, 균열의 깊이와 길이는 Table 2에 나타내었다.

나) 제작 절차

시험편의 재질은 일반 저탄소강이며 SA516 Gr. 70으로 면 가공을 행하였으며 1 Hz의 frequency로 예정된 깊이까지 피로 균열을 만들어서 electron beam welding을 수행하여 309 L, 60mm strip으로 피로 균열 상단부에 잠호 아크 용접을 수행한 후 cladding부위는 원자로 cladding 표면과 동일하게 표면 가공하며 기타 부위에 대해서도 면가공을 수행하였다.

2.2. 초음파탐상시험

본 실험은 다음과 같은 관점에서, 관련 data에 대한 경향성을 먼저 파악한 뒤 round robin방법으로 data를 취해 그 결과를 분석하고자 하였으며 이번은 그 경향성 및 기본 data를 구하였다.

- The probability of detecting underclad cracks
- The freedom from false calls
- The accuracy for flaw size measurements

2.2.1. 피복하부 결함 감지능 측정

본 실험에 사용된 초음파탐촉자는 일반적인 용접부검사에 사용되는 45°, 60° single shear wave 탐촉자와 기존 underclad cracks 검사에 사용되고 있는 70° 굴절종파 탐촉자 및 SWRI에서 최근 개발한 50/70 Tandem 탐촉자 및 SLIC-40 탐촉자를 가지고 수행하였다.

2.2.2. 결함크기 및 깊이 측정

검출된 결함에 대한 깊이 측정은 70° 굴절종파 탐촉자를 이용한 DAC(Distance amplitude Correction Curve)를 이용하는 방법과 SLIC-50탐촉자를 사용한 MOST (Multi-beam Observation Sizing Technique)방법을 이용하여 수행하였으며, 결함의 길이 측정은 amplitude drop technique를 이용하여 결함에서 나오는 최대 amplitude의 half(즉 6dB drop) 크기때의 길이와 base line noise level, (20% FSH 혹은 15% FSH) 즉 noise 정도의 amplitude로 떨어질 때까지의 길이의 두가지 방법으로 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 결함감지능력(Flaw detectability)

각종 탐촉자에 대한 결함 감지 능력을 알아보기 위하여 as-welded 상태의 A, B, C, type 시험편에 대하여 실험을 수행, 평가하였다. 실험시의 주사감도는 noise 신호가 전 화면 높이의 10%를 초과하지 않는 최대 gain 상태로 놓고 실험을 수행하였다.

피복면에 수직인 underclad notch(A-type)의 경우(Fig. 6) 70° 굴절종파의 신호가 50/70 multibeam 이나 SLIC-40 보다는 선명하게 관찰할 수 있었으나 피복면에 어떤 각도를 이룬 결함(B-type)의 경우 (Fig. 7) 50/70 multibeam 탐촉자와 SLIC-40는 방향에 관계없이 감지되었으나 70° 굴절종파의 경우는, 20°이상 기울어진 결함은 한쪽 방향에서만 감지되었다. 이는 피복하부 결함이 금속학적으로 입계 결함이므로 피복면과 어떤 각도를 이루고 생성될 수 있으며 이런 경우를 고려하여 70° 굴절종파의 경우는 주사 방향을 용접방향과 그 반대방향등 2방향으로 수행하여야 된다고 사료된다. 용접 방향과 어떤 각도를 이룬 결함(C-type)의 경우(Fig. 8)70°굴절종파의 경우는 용접방향과 15° 이상의 각도를 이루는 결함은 감지되지 않았으며 50/70 multibeam 탐촉자의 경우는 15° 각도까지 감지할수 있었다. 이는 피복하부 결함이 용접방향에 대하여 0°에서 45°의 범

위에서 생성될 수 있다는 보고서<sup>(9)</sup>에 의하면 50/70 multibeam탐촉자가 피복하부 결함 검출용으로 우수하다고 판단된다. 이상과 같은 3가지 종류의 시험편에서 수행한 실험의 종합결과 50/70 multibeam 탐촉자가 detectability 측면에서 다소 유리한 점이 있다고 판단되나 피복면이 매끄럽고 결함이 피복면에 수직일 경우 70° 굴절종파의 신호가 가장 선명히 나타나 10% FSH정도의 신호크기에서도 결함을 식별할 수 있는 장점이 있다. 반면에 B 또는 C-type의 결함과 같이 어떠한 방향성을 가지고 있을 경우 wide band 탐촉자인 50/70 multibeam 탐촉자가 굴절종파보다 sensitive한 것으로 나타나고 한방향으로만 주사하여도 결함 감지가 가능한 것으로 판단되므로 가동중 검사시 검사시간을 단축시킬 수 있으리라 사료된다.

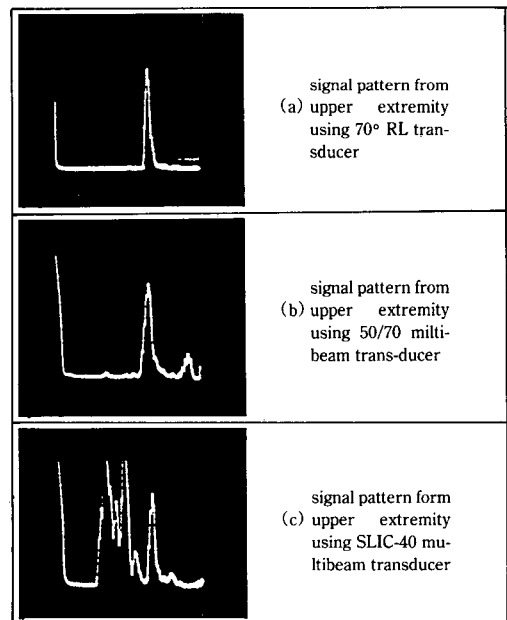


Fig. 6. Signal patterns from upper extremity of underclad notch using 70° RL, 50/70, SLIC-40 transducers

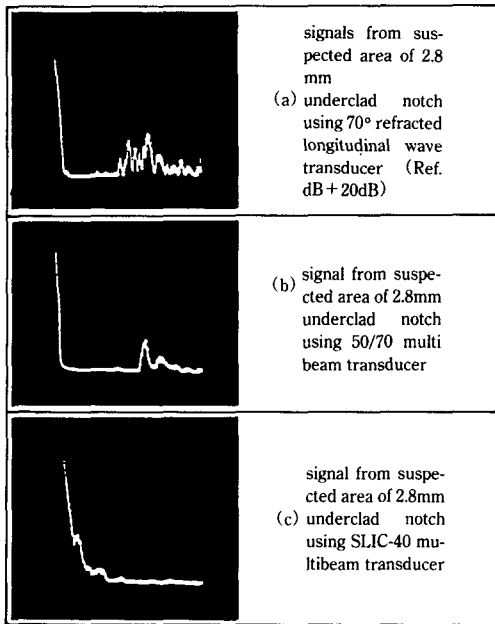


Fig. 7. Maximum signal amplitude from upper extremity of 2.8 mm, 10° angled B-type underclad notch

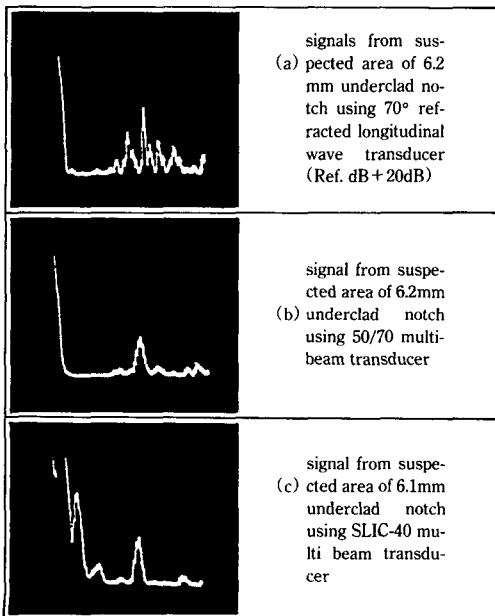


Fig. 8. Maximum signal amplitude from upper extremity of 6.2 mm, 15° angled C-type underclad notch

### 3.2. 결함 길이 및 깊이 측정

Mechanical fatigue crack이 삽입되어 있는 demonstration block에 대하여 결함의 길이 측정을 70 RL, SLIC-40, 50/70 Tandem 탐촉자로서 수행하였으며 crack깊이에 대한 평가는 SLIC-50로 M-PET(Peak-Echo Technique)과 M-SPOT(Satellite Pulse Observation Technique)를 이용한 MOST방법으로 수행하였다. 또한 이들 결함의 위치와 길이 및 깊이에 대한 정보는 검사자에게 전혀 언급함이 없이 blind condition하에서 수행되었다.

#### 3.2.1. 결함 길이 측정(Crack length estimation)

Crack의 길이 측정에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table에서 알 수 있듯이 결함의 위치와 길이 평가에 있어 70 RL 탐촉자가 다른 탐촉자에 비해 우수한 것을 알 수 있으며 50/70 multibeam 탐촉자는 검출에서는 우수하나 정확한 길이와 위치 평가에는 다소 뒤떨어짐을 알 수 있다. 이것은 탐촉자의 설계상의 문제로 사료되며 70 RL의 경우는 굴절 종파가 피복재 아래 약 12.5mm에 집속되게끔 설계되어 있으므로 broad band width 탐촉자보다는 길이와 위치 평가에는 다소 성능이 우수하리라는 것은 이미 예견되었던 것이다. 50/70 multibeam 탐촉자의 경우는 초음파 beam이 넓게 퍼지므로 결함의 길이 평가는 크게 나타나는 경향이 있고 위치도 70RL보다는 정확성이 뒤떨어진다. 또한 결함 길이의 평가 방법으로는 결함 신호가 base line noise level(약 15% FSH)로 떨어지는 양지점을 결함의 끝 선단으로 평가하는 방법이 실제 결함의 크기에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 이들 12개 mechanical fatigue crack은 피복면에서 수직으로 존재하기 때문에 검사자에 의해 전부 검출되었으나 향후 이러한 피로 crack을 용접 방향에 각도를 주어 심은 demonstration block을 만들어 round-robin test를 한다면 더욱 정확한 탐촉자 성능 분석 및 검출기술개발에 기여할 수 있으리라 사료된다.

Table 3. The results of crack length estimation

Transducers IND. No	70 RL			50/70 Tandem			SLIC-40			RMK (실제 길이)
	Length	X	Y	Length	X	Y	Length	X	Y	
F	47	138	426	50	167	417	47	138	426	수 직 (49.9)
	30			35			30			
K	53	285	758	70	290	740	48	285	758	평 행 (50)
	35			40			35			
L	54	225	115	65	220	120	57	225	115	" (49.9)
	45			47			45			
J	25	618	370	47	613	380	25	618	370	" (24.8)
	26			24			26			
I	23	614	772	45	620	747	22	614	772	" (20.2)
	18			27			18			
C	57	725	745	70	720	747	52	725	745	수 직 (54.9)
	45			35			45			
G	50	1023	717	69	1035	685	47	1023	717	평 행 (49.8)
	43			49			43			
H	50	800	173	68	885	175	50	800	173	평 행 (50)
	40			48			40			
A	30	1025	184	45	1050	175	28	1025	184	수 직 (25.3)
	24			30			24			
E	26	453	231	45	484	245	28	453	231	" (25)
	20			25			20			
D	53	474	577	47	500	585	42	470	577	" (50)
	47			24			47			

3.2.2. 결함 길이 측정(Crack length estimation)

Mechanical underclad fatigue crack에 대한 깊이 측정은 SLIC-50탐촉자로 M-PET technique와 M-SPOT technique를 이용하여 평가하였다. 실험결과는 Table 4와 Fig. 9, 10, 11에 나타내었다.

Fig. 9는 M-SPOT technique로 결함의 양 끝단에서 회절되어 나오는 두 신호의 screen division(SD)차를 바로 도표를 통해 깊이를 평가할 수 있다. 예를 들어 장비의 CRT에서 두 신호의 SD가 8로 나타났을때 이 결함의 깊이는 약 10mm정도의 결함이라는 것을 알 수 있다. 따라서 prescreening block에서 얻는 notch깊이(D<sub>n</sub>)와 SD와의 관계식은

$$D_n = 0.5569 + 1.2009 SD$$

를 얻을 수 있었다. 이러한 SD로 평가한 결함의 길이(estimated fatigue crack depth)와 실제 결함의 깊이(actual underclad fatigue crack depth)와 비교한 것을 Fig. 10에 나타내었다. 평가오차는 1.5mm정도로 나타났으며 underclad fatigue crack의 아래쪽 끝 선단에서 회절되어 나오는 신호와 standing wave와의 시간차로 계산하는 M-PET technique로 이 검사결과를 Table 4와 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보듯이 대개의 경우는 거의 정확한 결과를 얻을 수 있었으나 1~2 검사부위의 경우 오차가 상당히 크게 나타났는데 이것은 strip cladding이 겹쳐지는 부위에 있는 결함으로서 표면의 굴곡이 심한 경우로 data를 취할때 오차가 생긴것으로 사료되었다. 따라서 이러한 경우로 볼때 원자력에 피복용접후 용접표면 처리가 검사의

결과에 상당한 영향을 미친다는 것을 생각할 수 있다.

Table 4. The results of crack depth estimation

Transducer		SLIC-50					
IND.No	M-PET	M-SPOT	PMK	IND.No	M-PET	M-SPOT	PMK
K	60	13	평행	G	46	10	평행
E	42	8	수직	B	44	8	수직
D	56	15	∕	H	50	14	평행
I	20	6	평행	C	48	12	수직
J	20	*	∕	A	24	4	∕
F	46	12	수직	L	38	7	평행

\* : 신호평가 불가

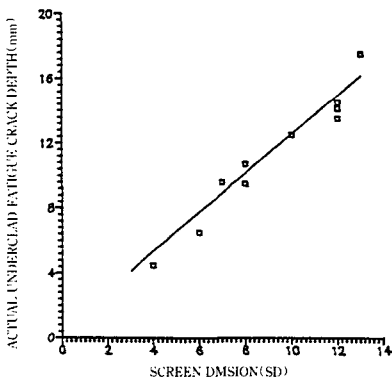


Fig. 9. Correlation of M-SPOT with actual underclad fatigue crack depth

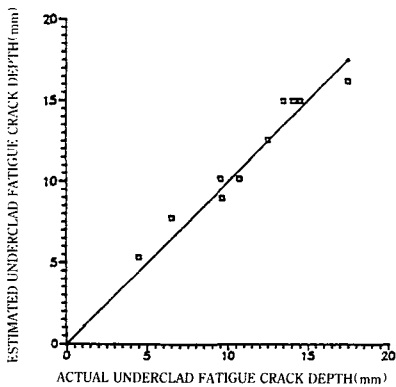


Fig. 10. Correlation of estimated underclad crack depth with actual underclad fatigue crack depth by M-SPOT.

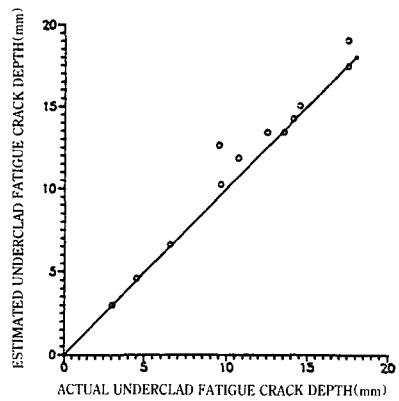


Fig. 11. Correlation of estimated underclad crack depth with actual underclad fatigue crack depth by M-PET.

#### 4. 결 론

이상의 prescreening block과 demonstration block의 피복하부 균열결함에 대하여 결함의 검출은 50/70 multibeam 탐촉자, SLIC-40, 70 RL로 수행하고 깊이 평가는 SLIC-50와 70 RL로 수행한 실험 결과 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 피복면에 어떠한 각도를 갖고 있는 경우 50/70 multibeam 탐촉자는 결함이 7mm 이상된 경우에는 방향에 관계없이 모두 검출되었으나 70° 굴절 종파 탐촉자는 결함이 20° 이상 기울어져 있을 경우 한 방향에서만 검출되었으므로 70° 굴절종파로 검사할 경우 용접 방향과 그 반대 방향의 2가지 방향으로 검사를 수행해야 할 것으로 사료된다.
2. 피복 용접 방향에 어떠한 각도를 이루고 있는 결함의 경우 50/70 multibeam 탐촉자는 15° 각도까지 검출할 수 있었으나 70° 굴절 종파 탐촉자는 10° 각도 범위내에서만 검출 가능하였다.
3. 검출된 결함의 길이 측정은 70° 굴절종파가 가장 우수한 것으로 사료되며 이는 70° 굴절 종파 탐촉자의 초음파가 피복하부 약 7~12mm에서 최대 에너지를 갖고 좁은 부위에 집중되기 때문이라 사료된다.

4. 길이 측정 방법은 최대 초음파 신호를 나타내는 지점에서 양쪽으로 탐촉자를 이동하여 신호가 base line noise level(약 15% FSH)로 떨어지는 지점을 결함의 양끝단으로 하는 amplitude drop method가 6 dB drop method보다 정확한 것으로 사료된다.
5. 결함의 깊이 측정은 SLIC-50으로 M-SPOT와 M-PET technique를 이용한 MOST(Multibeam Observation Sizing Technique)가 70°굴절 종파를 이용하여 DAC(Distance Amplitude Correction Curve)방법으로 수행한 것보다 정확한 것으로 사료된다.

#### 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) U.S.Nuclear Regulatory Commision Reg. Guide 1.150 "Ultrasonic Testing of Reactor Vessels Welds during Preservice and Inservice Examination" Revision 1. Feb. 1983.
- 5) 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.
- 6) 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, pp426~432.
- 7) 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 1982, pp 10-13
- 8) 박치승 외 "원자력 압력 용기의 피복하부 결함 검출에 대한 고찰" 비파괴 검사, 제16호, Vol.9, No.2, 1989, pp42~49
- 9) Druce. S. G. and Hudwon, J. S. "Defects Arising from Welding and Cladding PWR Pressure Vessel Steels-A Review. UK Atomic Authority AERER 10418, Feb. 1982.



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

C. S. Park and K. W. Kang

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received March 20, 1993)

**Abstract** It has not been performed to inspect the underclad cracking of nuclear pressure vessel in Korea since there is no code requirements for inspection. However, underclad cracks in nuclear pressure vessels have been reported since the early 1970s. The aim of this experiment is to find the suitable ultrasonic inspection techniques for underclad cracking. The various transducers, for example 70、refracted longitudinal wave, 50/70 multibeam, SLIC-40, SLIC-50, are used in this investigation. Experiments on prescreening blocks and a demonstration block under the same condition as in the nuclear power pressure vessels show that the 70、refracted longitudinal wave method is the best one for the length evaluation and also gives a good signal pattern for detection of the crack, while the 50/70 multibeam transducer is more effective for the detection of underclad cracking. On the other hand, the SLIC-50 transducer using M-SPOT(Satellite Pulse Observation Technique) and M-PET (Peak-Echo Technique) methods is the most effective one for the depth of underclad crack estimation.