

초음파를 이용한 강수부에서의 비상노심냉각수 수막두께 측정

신용승^a, 황선홍^a, 권태순^a, 송철화^a

^a 한국원자력연구소 열수력안전연구부, 대전광역시 유성구 덕진동 150, ex-coal@kaeri.re.kr

1. 서론

종래의 한국 표준형 원전 (KSNP) 에서는 비상노심냉각수를 저온관에 주입하는 Cold Leg Injection (CLI) 방식을 채택한 반면, 신형원자로인 APR1400 에서는 비상노심냉각수를 원자로용기 강수부에 직접 주입하는 Direct Vessel Injection (DVI) 방식을 채택하여 대형냉각재 상실사고 (LBLOCA) 발생시 저온관 파단부를 통한 비상노심냉각수의 누출 손실을 최소화하고 있다[1]. 최근 국내에서 수행된 APR1400 DVI 방식의 안전주입계통에 대한 실험결과에 따르면 노심베럴에 부딪쳐 퍼지는 비상노심냉각수 수막의 분포 등이 비대칭적인 분포를 보이며, 특히, 강수부 하부로의 침투가 두드러지는 경향을 보이는 영역의 존재가 보고되고 있다[2]. DVI 관에서 분출된 냉각수가 노심베럴에 부딪쳐 형성하는 수막의 분포는 강수부내의 유동을 파악하는 중요한 단서가 된다. 이에 본 연구에서는 강수부내에서의 비상노심냉각수 유동에 대한 기초연구의 일환으로 초음파를 이용한 비상노심냉각수 수막두께 실험을 수행하였다.

2. 측정원리

수막두께의 측정은 매질에서의 초음파의 속도와 물과 공기와의 경계면에서 반사되는 반사파의 왕복시간을 측정함으로써 계산할 수 있다.

$$\text{수막두께} = \text{왕복시간} \times \text{초음파속도} / 2$$

3. 실험장치

초음파를 이용한 수막두께 측정을 위한 실험장치를 구축하였다. 테스트 섹션은 기존의 DIVA 장치[3]의 강수부를 이용하였고, 초음파 관련 측정장비로는 초음파 송/수신기, 초음파 트랜스듀서, 초음파 신호처리를 수행하기 Data acquisition system으로 구성되어 있다.

그림 1 에 실험장치를 나타내었다. 테스트 섹션은 내경 845mm, 외경 928mm, 사이공간의 두께 41.5mm 의 환형 강수부로 유로의 재질은 육안관찰이 가능한 아크릴로 되어 있다. 강수부의 외벽에는 저온관(CL), DVI 관이 각각 4 개씩, 고온관 2 개가 있다. 저온관과 고온관의 고도는 동일하며 DVI 관은 그보다 428mm 상부에

위치하고 있다. 실험시, 저온관에서는 공기가 DVI 관에서는 냉각수가 나온다.

그림 2 에 초음파 측정장비를 나타내었다. 사용된 초음파 트랜스듀서의 주파수는 5MHz 이며 직경은 6mm 이다. 초음파 송수신기는 송신시는 1 초에 약 1000 번의 펄스파를 방출하며, 수신시에는 최대진폭 245V, 대역폭 35MHz 을 가진다. 초음파 트랜스듀서는 3cm 간격으로 10 개를 사용하였으며 트랜스듀서 홀더에 부착되어 있어 한 묶음으로 거동한다. 홀더는 원주방향으로 360 도 자유로이 회전가능하도록 되어 있다.

Data acquisition system 으로는 100MS/s 가 가능한 A/D 보드를 사용하였고, 데이터의 측정, 디스플레이, 분석, 저장을 위한 프로그램을 LabView 를 이용하여 작성하였다.

실험은 Direct Bypass ECC film test 와 Sweep out ECC film test 를 수행하였다. 각 테스트에서의 유동조건으로 DVI 관의 냉각수 속도는 0.89m/s 로 고정하였고, 저온관에서의 공기 속도는 5, 7.5, 10, 13m/s 로 설정하였다.

4. 실험결과 및 결론

그림 3 에 실험결과의 일부를 나타내었다. 실험조건은 Direct Bypass test 에서 냉각수 속도 0.89m/s, 공기속도 13m/s 이다. 수막두께는 1000 번의 초음파 펄스중 반사파가 측정된 경우의 결과를 평균한 값이다. 경계면을 제외하면 안정적으로 수막이 형성되는 영역에서는 수막의 두께를 잘 측정함을 알 수 있다. 측정결과로부터 수막형태를 그림 4 와 같이 3 가지의 형태로 분류하였다.

A 영역은 액막의 경계부분으로 경계부분이 끊임없이 확장 수축을 반복하고, 액막이 되말리며 벽면으로부터 주기적으로 이탈하고, 기포가 유입된다. 즉, 수막의 표면이 아크릴판과 평행을 이루지 못하고 어느 정도의 각도를 형성하고 있다. 또한 표면도 매끄럽지 못하다. 따라서 수막표면으로부터의 반사파가 Transducer 에 다시 검출된 확률이 낮아 측정이 어려운 영역이다. 또한 측정된 데이터의 분석결과 표준편차가 크게 나타나고 있는데 이는 경계면이 수축과 확장을 반복하여 수막이 일정하지 않고 되말리는 수막에 다수의 기포가 유입되기 때문이다.

B 영역은 DVI 노즐에서 나온 냉각수가 물기둥을 형성하는 영역으로 초음파가 반사되어 나올 면이 없기 때문에 측정이 불가능한 영역이다.

C 영역은 A, B 를 제외한 영역으로 항상 일정하게 수막이 형성되어 있고 수막의 표면이 아크릴판과 거의 평형을 이루며 공기의 유입도 거의 없는 지역이다. 따라서 수막의 표면에서 반사된 반사파가 Transducer 에 검출될 확률이 높아 초음파를 이용한 두께 측정이 잘 되는 영역이다. 이 영역에서 수막두께가 거의 일정하게 유지됨을 보여주고 있다. 그러나 A 영역의 외곽 테두리부분에서의 수막은 A 영역으로부터 이탈되는 수막과 수막외곽으로부터 떨어지는 수막 때문에 수막의 두께가 일정하지 않고, 다수의 기포가 유입되어 있다. 수막두께 데이터의 표준편차가 크게 나타나고 수막두께는 측정 확률이 매우 낮게 나타나고 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 재정적 지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 송철화 외, 차세대원자로 설계 검증 및 핵심기술 개발, KAERI/RR-2219/2001 (2001)
- [2] T.S. Kwon, B.J. Yun, D.J. Euh, I.C. Chu, and C.H. Song, Multidimensional mixing behavior of steam-water flow in a downcomer annulus during LBLOCA reflowing phase with a direct vessel injection mode, Nuclear Technology, Vol.143, p. 57-64, 2003.
- [3] 윤병조 외, 차세대 대형 냉각재 상실사고 모의를 위한 물/공기 실험[DIVA]의 장치구축 보고서, KAERI/TR-2102/2002 (2002)

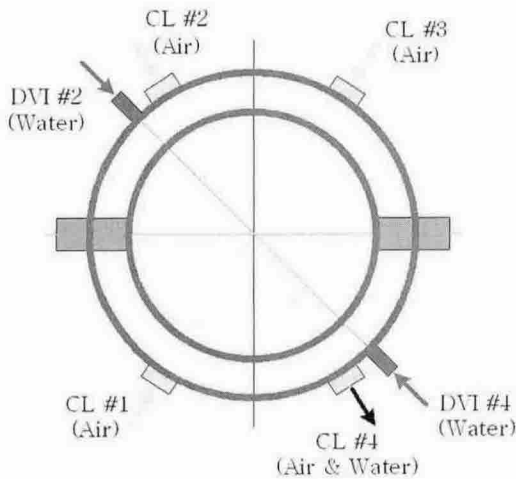


그림 1. DIVA 장치의 테스트 섹션

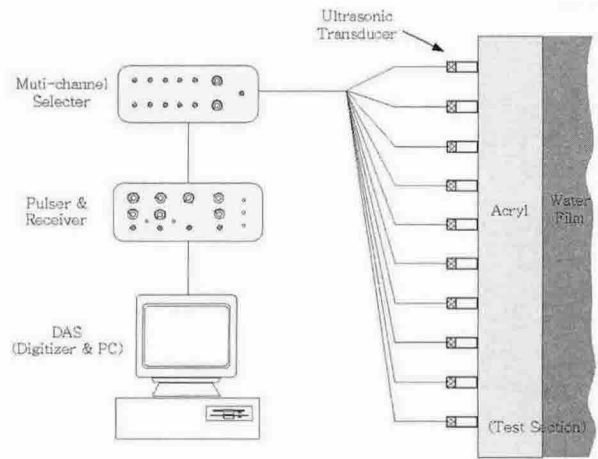


그림 2. 초음파 측정장비 구성

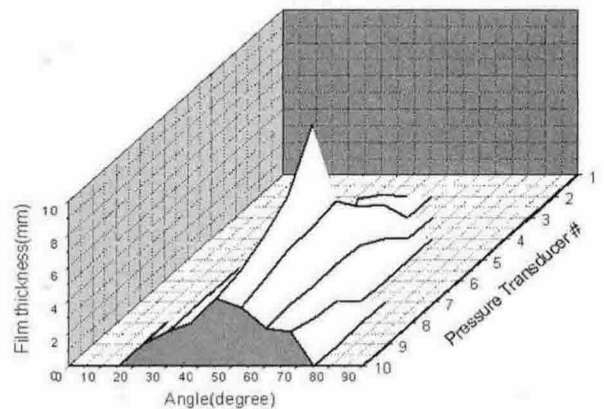


그림 3. 수막측정 결과

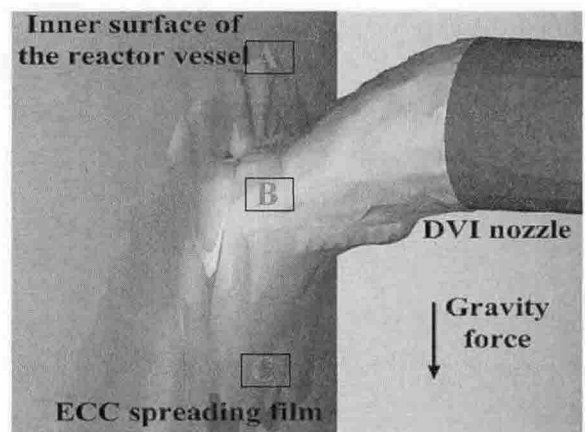


그림 4. 강수관 내에서의 수막형태