

중수로 원전 FARE 채널 저유량 발생원인 분석

Investigation of Low Flow Trip Alarm of FARE Channel at Wolsong NPP

이선기, 이상국, 손석만, 이옥륜, 김태룡
한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 130

이강용, 홍순성
한국수력원자력(주)
경북 경주시 양남면 나아리 260

남궁 인
한국전력기술(주)
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

월성원자력발전소 원자로는 380개의 핵연료 채널이 원형의 모양으로 구성되어 있다. 이중 외곽부의 핵연료 채널은 중심부에 비해 핵연료의 발열량이 적음으로 적은 유량이 흐르고 있다. 월성 원전의 경우 핵연료 교체는 핵연료 채널 내부의 유체력을 이용하여 이루어지며 이때 원자로 중심부의 채널은 유량이 충분하므로 채널내의 핵연료가 냉각수의 흐름에 따라 하류측 핵연료 교체기내로 흘러 내려간다. 그러나 외곽부 채널의 경우 냉각수의 유량이 적어서 핵연료가 흐름에 밀려가지 않는다. 이의 보완을 위해서 외곽부 채널의 경우 유체 저항을 증가 시키는 기구(FARE : Flow Assist Ram Extension)를 사용하여 핵연료를 밀어내게 된다. 이러한 과정에서 FARE 기구가 과도하게 냉각수의 흐름을 제한하여 채널 내에 저유량 현상이 발생하고 있다. 본 연구에서는 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상 발생원인 및 개선책으로써 개량형 FARE 기구를 제작하여 성능을 평가하였다. 그 결과 FARE 기구의 설계 변경으로 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상의 해소가 가능한 것으로 판명되었다.

Abstract

At Wolsong site in Korea, four CANDU6 type reactors are operating now. The CANDU type

reactors require on power refuelling by the two remotely controlled F/Ms (Fuelling Machines). The refuelling operation is carried out along the coolant direction by the drag force of fuel bundles for most channels; however, for about 30% of channels the coolant flow is not sufficiently high enough to carry fuel bundles to the downstream. Therefore, a device, FARE(Flow Assist Ram Extension) device, is used to create an additional drag force to push the fuel bundles along the coolant flow. The FARE device has been causing the channel flow low phenomena of SDS1 (shut down system 1) channels due to more than excessive blockage of coolant flow. The flow rate change for the SDS1 channels is monitored on line for the coolant flow blockage of the channels. This has initiated the investigation of the FARE device behavior and the cause and remedy for the problem. The analysis revealed that the channel flow low occurs as the insertion of the FARE device into the active core flow and disappears as the removal of the FARE device from it. In order to eliminate the channel flow low phenomena, flow resistance by the FARE device should be reduced. The analysis has revealed that a too much relaxation of flow resistance would make the FARE device unable to push the fuel bundle string, and a too little relaxation would make the FARE device unable to eliminate the channel flow low phenomena. Suggested design changes include more flow holes in the tube.

1. 서 론

FARE 기구를 이용한 핵연료 교체방식은 캐나다 Pickering 원전에 처음 적용되었다. Pickering 원전의 핵연료채널 내의 냉각수 유량범위는 최대 21.5kg/s에서 최소 15kg/s로 비교적 핵연료채널 내 유량범위가 비교적 작아서 FARE 기구의 유체저항에 의한 추력의 변화가 작다. 반면 월성 원전의 경우 핵연료채널 내의 냉각수 유량범위는 설계기준으로 28.3kg/s에서 최외곽 채널의 경우 11.2kg/s로 유량 변동 폭이 크다(그림1 참조).

채널의 유량 별로 여러 개의 FARE 기구를 만들 경우 조작실수로 서로 혼동이 올 수 있고, 제작비용이 증가하므로, CANDU6의 FARE 기구는 유체저항이 유량에 따라 변하는 가변저항 기능을 갖도록 설계되어 있다. 즉 한 종류의 FARE 기구를 이용하여 모든 FARE 채널의 핵연료교체 작업을 할 수 있도록 하였다. 그러나 FARE 기구가 과도하게 냉각수의 흐름을 제한하여 채널 내에 저유량 Trip 신호가 발생하고 있다. FARE 채널의 저유량 Trip 신호는 기준유량의 80% 이하에서 발생한다. 표1에 FARE 채널의 핵연료 교체 이력의 일례를 나타낸다. 월성 원전의 경우 FARE 삽입시 약 1분 50초간, FARE 회수시 약 30초간 저유량 Trip 신호를 경험하고 있다.

본 연구에서는 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상 발생원인을 FARE 채널 내부 유동 분석 및 실험으로 규명하였으며, 저유량 현상 개선을 위해 개량형 FARE 기구를 제작하여 성능을 평가하였다.

2. FARE 채널 내부의 유동

2.1 FARE 기구 구조

그림2에 FARE 기구를 나타낸다. FARE 기구는 핵연료 다발과 접촉하는 부분(fuel adapter)과 유량제어부분(flow orifice) 및 C-ram과의 체결부분(sleeve and stem)으로 나뉘어 진다.

FARE 기구의 전체 길이는 핵연료다발 2개의 길이와 같고 외경은 핵연료다발의 외경과 같도록 하여 핵연료교환기, 핵연료관 및 종단이음부와 호환성이 있도록 설계되어 있다. FARE 기구의 앞부분은 핵연료 접촉부(fuel adapter, 그림2의 1)인데, 핵연료다발의 종단 지지판(end plate)과 접촉하고 핵연료다발을 균일하게 지지하기위해 종단 지지판과 같은 3개의 동심원을 형성하고 있다. 핵연료접촉부분과 유량제어부분 사이는 지르칼로이 튜브(그림2의 2)로 연결되어있다. 지르칼로이 튜브에는 구멍이 뚫려 있어서, 냉각수흐름이 가능하도록 되어있다. 유량 제어부(flow orifice)는 오리피스 하우스(orifice housing, 그림2의 3), 스프링 홀더(spring holder, 그림2의 12) 링오리피스(ring, 그림2의 4) 및 스프링(spring,그림2의 11)으로 이루어져있고, 링오리피스는 스프링(그림2의 11)에 의해 닫혀 있다. 오리피스 하우스에는 4개의 우회유로 통로 (bypass slots)이 있어서 링오리피스가 움직이면 네 개의 통로를 통해 냉각수가 흐른다. 링오리피스는 4개의 링으로 이루어져 압력차를 크게 하고, 압력관의 내경 변화에 따른 민감도를 줄여준다.

2.2 FARE 기구 특성

월성 원전의 경우 유량이 15.1kg/s인 채널에서 FARE 기구의 유동 저항력이 최소한 207kPa가 되도록 하고, 유량이 최대 21.5kg/s인 채널에서 사용가능 하도록 설계되었다. 유량이 21.5kg/s인 경우 FARE 기구의 유동저항에 의한 압력 강하는 약 414kPa이다.

그림3에 FARE 기구의 유량 변화에 따른 작용력을 나타낸다. 그림에서 오리피스가 닫혀있는 저유량 범위(~9.5kg/s), 오리피스가 열리기 시작하는 과도 유량범위, 오리피스가 유량에 따라 가변적으로 열리는 중간 유량범위 (9.5kg/s ~ 32kg/s), 및 오리피스가 완전히 열리는 고 유량범위(32kg/s~)로 구분된다.

저유량 범위 (~9.5 kg/s)는 실제 CADNU6 원자로의 채널에는 발생하지 않는 저 유량 영역이다. 유동 저항은 물체의 모양과 유체의 유동속도, 점성 및 밀도의 함수인데, 이 영역에서는 링 오리피스가 닫혀있으므로 유량이 증가함에 따라 유동 저항은 2차함수의 형태로 증가한다. 유량의 흐름은 FARE 기구의 전단부, 오리피스 부위 및 후반부를 차례로 지난다.

과도 유량영역에서 FARE 기구 튜브 어댑터 부위의 링 오리피스는 유동 저항으로 밀리면서 슬롯을 개방한다(그림 2 참조). 그림 8에서 이 부분은 저 유량 영역에서 중간유량영역으로 천이 되는 부분이고, 저 유량 영역의 마지막부분에 해당한다. 이 순간 링 오리피스를 미는 스프링의 힘과 링 오리피스를 지나는 유동저항의 힘이 균형을 이룬 상태

이다. 유량이 증가하면, 링 오리피스와 튜브 어댑터 모체 사이의 틈으로 유량이 흐르기 시작한다. 유량이 좀더 증가하면, 오리피스 슬롯이 급히 열리면서 좀더 많은 유량이 슬롯을 통해 흐르고 오리피스 전후의 압력 손실은 유량에 비해 약간 줄어든다. 유량이 많은 영역에서 줄어드는 경우에도 유사한 과정을 거쳐서 슬롯이 닫힌다.

중간 유량범위 (9.5kg/s ~ 32kg/s)에서는 유량이 증가하면 오리피스에 가해지는 유동 저항이 커지고 이에 따라 오리피스를 지지하고 있는 스프링에 작용하는 힘이 커진다. 스프링이 수축하면 오리피스와 연결된 슬롯이 더 많이 개방되어 더 많은 냉각수가 바이패스 슬롯을 통해 흐르게 된다. 그래서 이 영역에서는 유량의 증가에도 불구하고 유동 저항력은, 이차함수 적으로 증가하지 않고, 아주 완만하게 증가한다. 즉 이 영역에서는 스프링이 링 오리피스를 미는 힘과 오리피스를 지나는 유동 저항이 균형을 이루며 슬롯이 유량의 변화에 대응하여 열려서 바이패스 유량을 조절한다.

2.3 핵연료 채널 내부유동

핵연료 채널 3차원 내부유동을 해석하기 위한 단순화한 형상과 FARE 기구의 조립도를 그림 4, 해석결과의 일예를 그림 5에 나타내며 해석은 FARE 기구가 핵연료 채널 입구 초부터 Linear Tube Hole 통과 이후까지 7단계에 걸쳐서 수행하였다. 유동해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 계산결과의 모든 경우에 있어서 Linear Tube Hole부에서 유동변화가 크게 나타났다.
- FARE 기구의 Casing 및 Fuel Adapter의 치(齒)부가 Linear Tube Hole을 통과할 때 유동변화가 복잡하게 나타났다.
- FARE 기구의 Fuel Adapter의 구멍부는 Linear Hole을 통과한 냉각수의 중요 유동로 입을 알 수 있다.
- Linear Tube Hole과 FARE 기구의 공유면이 넓을수록 Hole을 통과하는 유속이 증가하는 경향을 보였다.
- 모든 계산결과에서 중수로 채널 내로 유입된 냉각수의 유동분포는 채널의 상부보다 바닥면에서 크게 나타났다.
- FARE 기구 중 Tube Adapter를 기준으로 전단부에서 유동변화가 극히 작게 나타났다.

3. FARE 채널 저유량 발생원인 분석

핵연료 교체 작업 시 FARE 기구 사용에 따라 나타나는 저유량 현상은 앞에서 분석한 바와 같이 상류측 핵연료 교환기가 FARE 기구를 삽입하고 제거 할 때 일시적으로 나타나며 유동 해석 결과에서도 FARE 기구의 Casing 및 Fuel Adapter의 치(齒)부가 Linear Tube Hole을 통과할 때 유동변화가 복잡하게 나타나는 점으로부터 FARE 기구 핵연료

어댑터 부위(그림 2의 부품 1과 2)가 채널 종단 라이너 튜브의 구멍을 지나는 유동 흐름을 과도하게 방해하여 발생한 것으로 판단된다.

이의 확인을 위하여 그림6, 그림7에 나타내는 FARE 기구 및 핵연료 채널 내부 유동 실험 장치를 설계 제작하여 저유량 발생 원인을 분석하였다. 실험은 FARE 채널의 초기 유량을 13 kg/s, 16 kg/s, 18 kg/s, 22 kg/s의 4개의 유량에서 수행하였으며 그 결과를 그림8에 나타낸다. 그림에서 가로축은 FARE 기구의 FARE 채널 내부에서의 위치를, 세로축은 FARE 채널 내부의 유량을 나타낸다.

그림에서 각 유량 모두 2단계에 걸쳐서 유량이 감소하는 것을 알 수 있다. FARE 기구가 핵연료 채널 내부로 들어오는 초기 단계에서는 유량의 변화가 거의 없으며 FARE 기구의 위치 8cm에서 1단계로 유량이 감소하기 시작한다. 이 위치는 FARE 기구의 선단이 Linear Tube Hole의 둘째 열을 통과 할 때이며, 이 후 조금 씩 감소하고 있다. 2단계로 유량이 감소하는 FARE 위치는 72cm 부근이다. 이 위치는 FARE 기구의 링 오리피스가 Linear Tube Hole의 첫째 열을 통과 할 때이며, 이 후 링 오리피스가 Liner Tube Hole의 끝단을 지날 때 까지 지속 된다.

이와 같이 FARE 채널의 저유량 현상은 FARE 기구의 선단이 Linear Tube Hole을 지날 때부터 링오리피스가 Linear Tube Hole의 끝단을 지날 때 까지 지속되며 이 시간은 현장에서 핵연료 교체시 발생하는 저유량 Trip 신호 시간(약 1분 50초간)과 거의 일치하고 있다.

이상으로부터 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상은 FARE 기구가 Linear Tube Hole을 통과 할 때 과도한 압력 손실이 발생하는 것이 직접적인 원인임을 알 수 있다.

4. 저유량 해소를 위한 FARE 기구 개선

앞에서 기술한 바와 같이 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상은 FARE 기구가 Linear Tube Hole을 통과 할 때 과도한 압력 손실이 발생하는 것이 직접적인 원인이다. 이의 개선책으로써 FARE 기구 선단의 치차 모양의 돌출 부위를 변경하여 흐름을 원활히 하는 방안 및 FARE 기구 몸통의 Hole 수를 증가한(그림9) 2가지 방안에 대해서 설계 변경하여 실험을 수행하였다.

그림10에는 치차부의 설계변경 결과를 원형과 비교해서 나타낸다. 그림에서 보듯 치차부의 설계 변경은 저유량 현상 해소에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

그림11에는 FARE 기구의 몸통부에 Hole 수를 증가한 결과를 원형과 비교해서 나타낸다. 그림에서 유량이 감소하는 위치는 변화는 없으나 유량이 감소하는 양에서는 약 50%가 개선되고 있음을 알 수 있으며 몸통부의 Hole 수 증가는 FARE 채널에서 발생하는 저유량 해소에 유효하다.

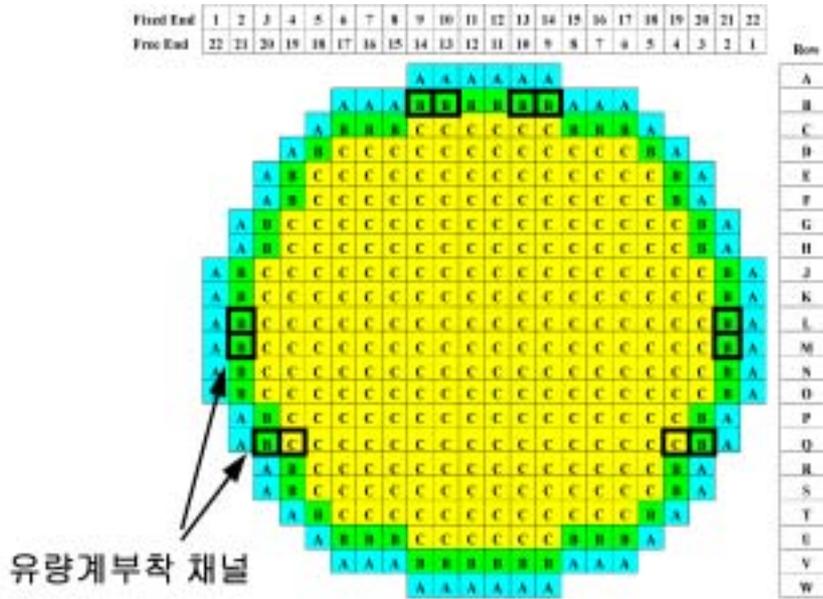
5. 결론

본 연구에서는 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상 발생원인을 내부 유동 해석 및 실측실험으로 규명하였으며 개선책으로써 개량형 FARE 기구를 제작하여 성능을 평가하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상은 FARE 기구가 Linear Tube Hole을 통과 할 때 과도한 압력 손실이 발생하는 것이 직접적인 원인이다.
- (2) FARE 기구의 설계 변경으로 FARE 채널에서 발생하는 저유량 현상의 해소가 가능하며 특히 FARE 기구 몸통 Hole 수를 증가시키는 것이 유효하다.

참고문헌

1. I.,Namgung, S.K.Lee, "FARE device hydraulic characteristic of Wolsong NPP," 13th PBNC Conference, Shenzhen, China, Oct. 2002.
2. Wolsong NPP - Flow Assist Ram Extension (FARE) Tool Design Manual, 1994
3. Wolsong NPP Primary Heat Transport System Design Manual, 1995
4. Wolsong NPP Fuelling Machine Head Design Manual, 1995
5. Wolsong NPP - FARE device drawings, 1994
6. I. Namgung, "Analysis of Fuelling Sequence and Fatigue Life for 4-Bundle Shift Refuelling Scheme in CANDU6 NPP", Journal of KNS, Vol.34, No.2, 2002
7. W.F. Waters, "Fuel String Force Measurement for 37 Element Fuels", AECL-IR280, 1978
8. Correspondence with Wolsong site.

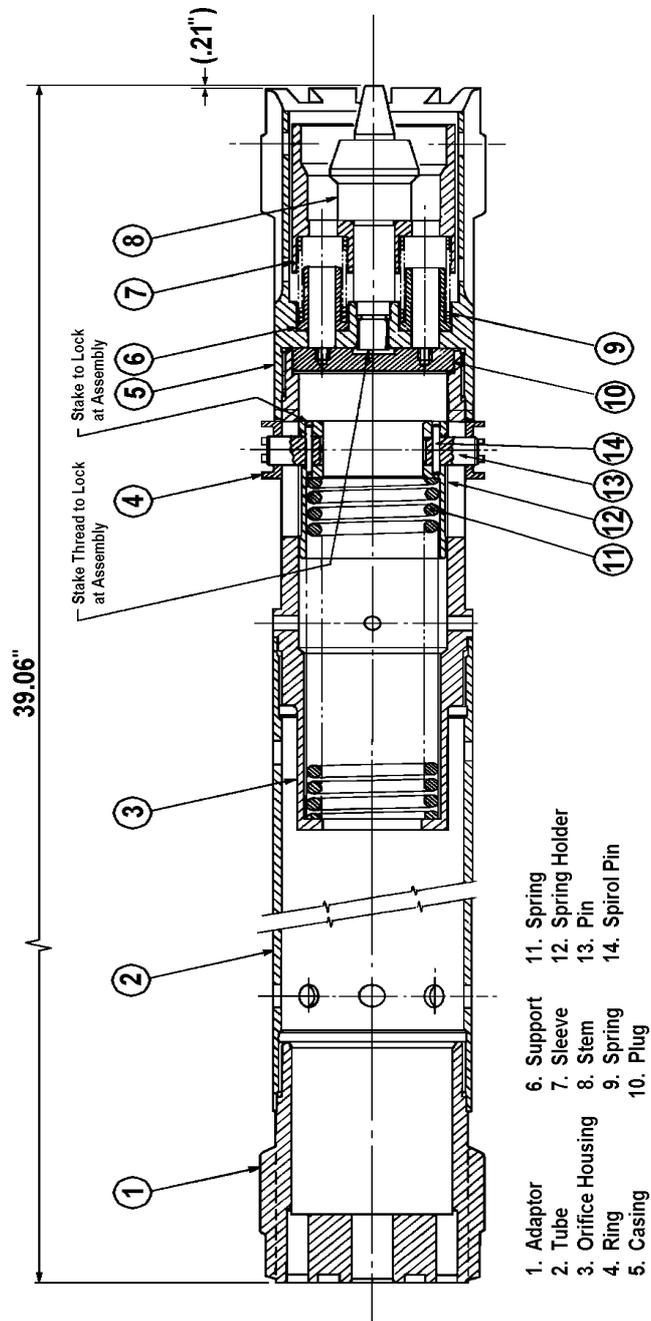


- 월성 1호기 : FARE channel Maximum flow : 20.4(kg/s)
FARE channel Minimum flow : 11.1 (kg/s)
- 월성 2호기 : FARE channel Maximum flow : 20.54 (kg/s)
FARE channel Minimum flow : 11.53 (kg/s)

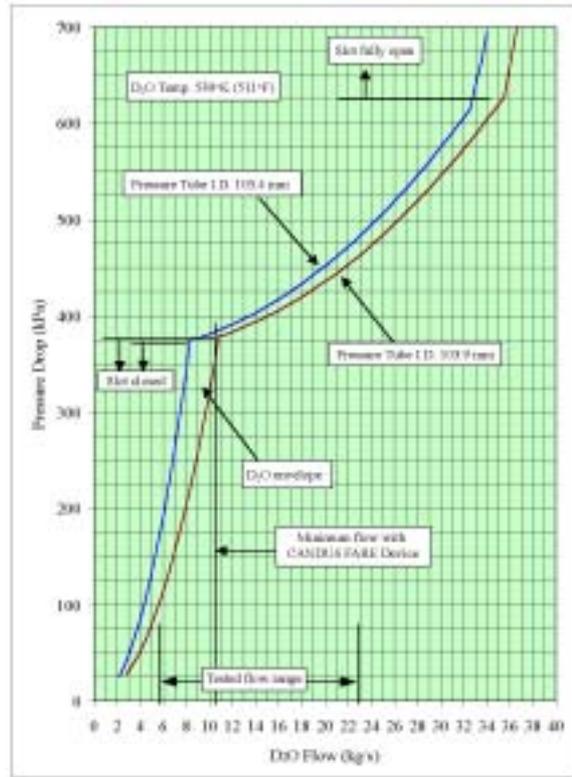
< 그림1 월성 원전 핵연료 채널 >

표1 핵연료 교체시의 시간 이력

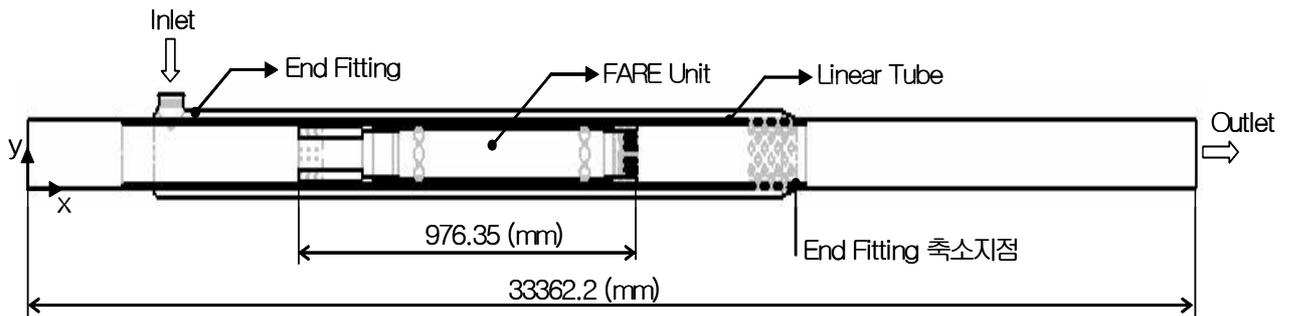
Time	Flow rate (%)	F/M command
9:40	100	Before Closure Plug removed
9:49	97	Closure Plug removed
9:57	97	Upstream Shield Plug removed
9:59	97	1st fuel pair inserted
10:01	97	2nd fuel pair inserted
10:02	96	3rd fuel pair inserted
10:04	95	Downstream F/M B-ram retract
10:10	95	Downstream F/M store Shield Plug in Magazine
10:14:07	75	Trip signal time: 10:14:09
10:15	75	Reset time: 10:15:56
10:19	82	Downstream F/M receives 4th spent fuel pair
10:24	78	Trip signal time: 10:24:43
10:24:30	75	Reset time: 10:25:24
10:25:51	95	FARE tool removed from core.



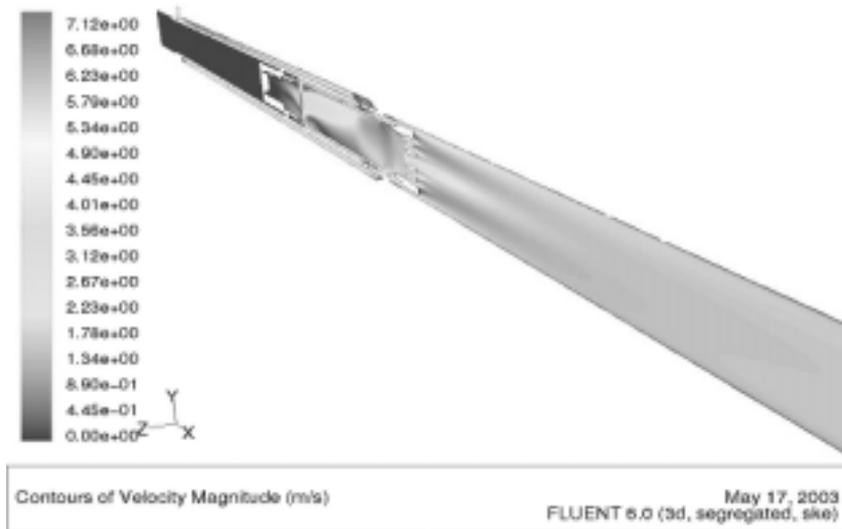
< 그림2 FARE 기구 개략도 >



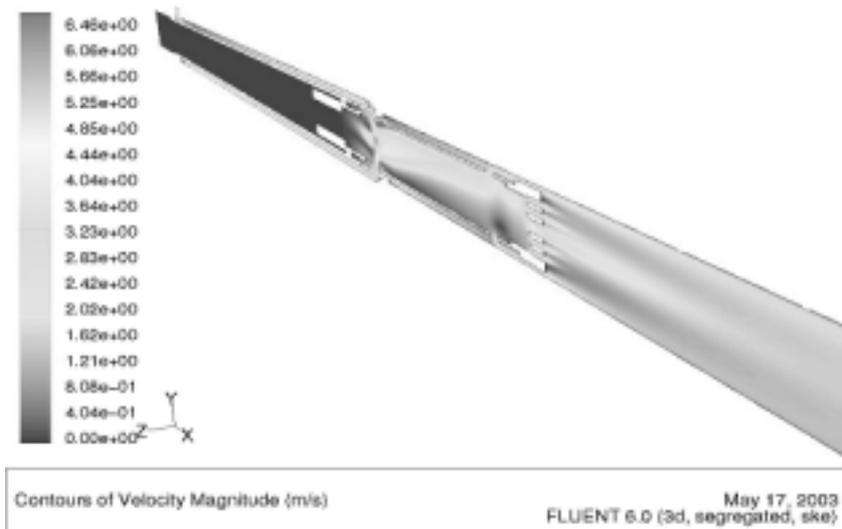
< 그림3 FARE 기구 설계 특성 >



< 그림4 FARE 기구 및 FARE 채널 유동해석 영역 >

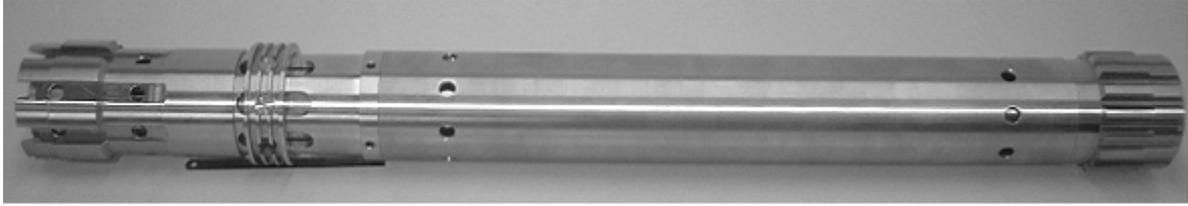


Case 4

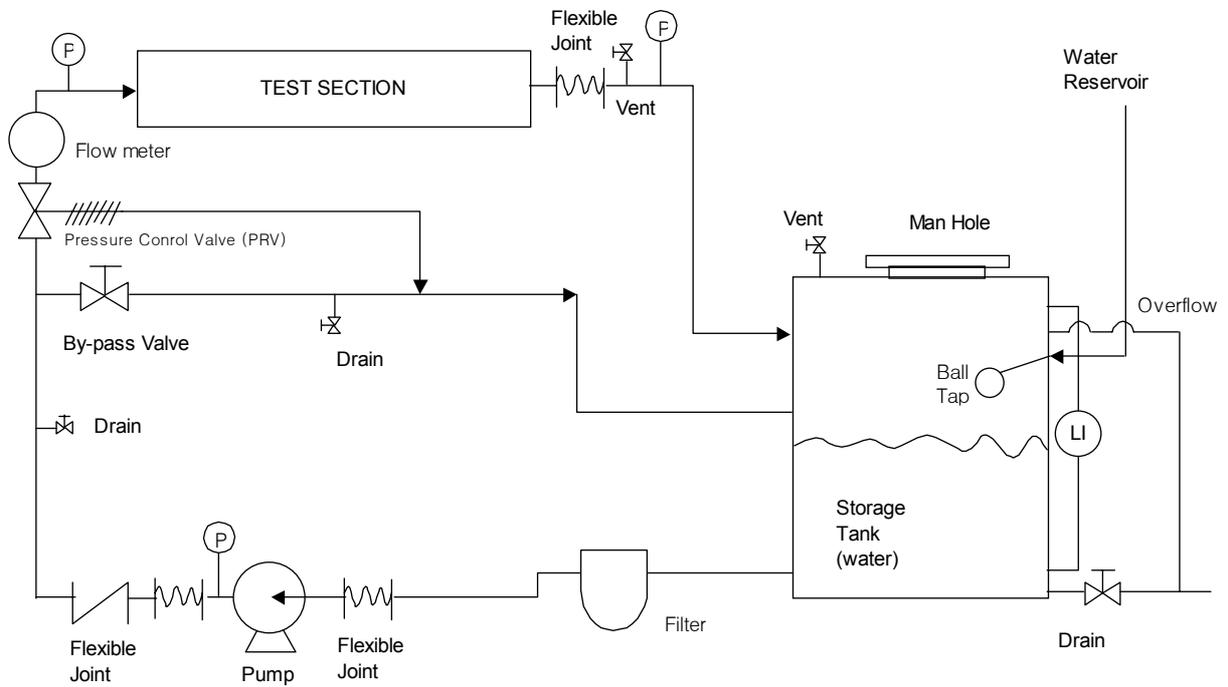


Case 5

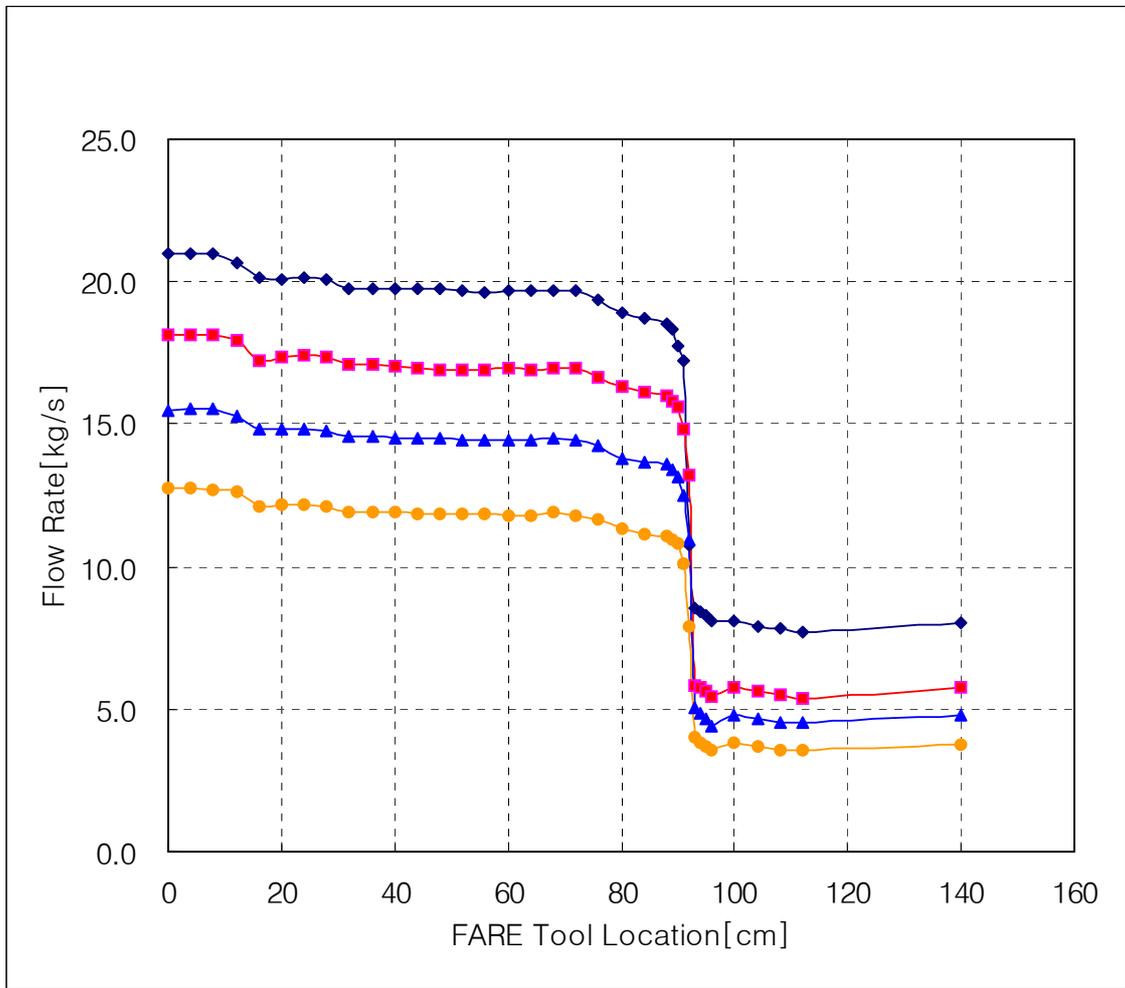
< 그림5 FARE 채널 내부유동 해석결과 예 >



< 그림6 시험용 FARE 기구 >



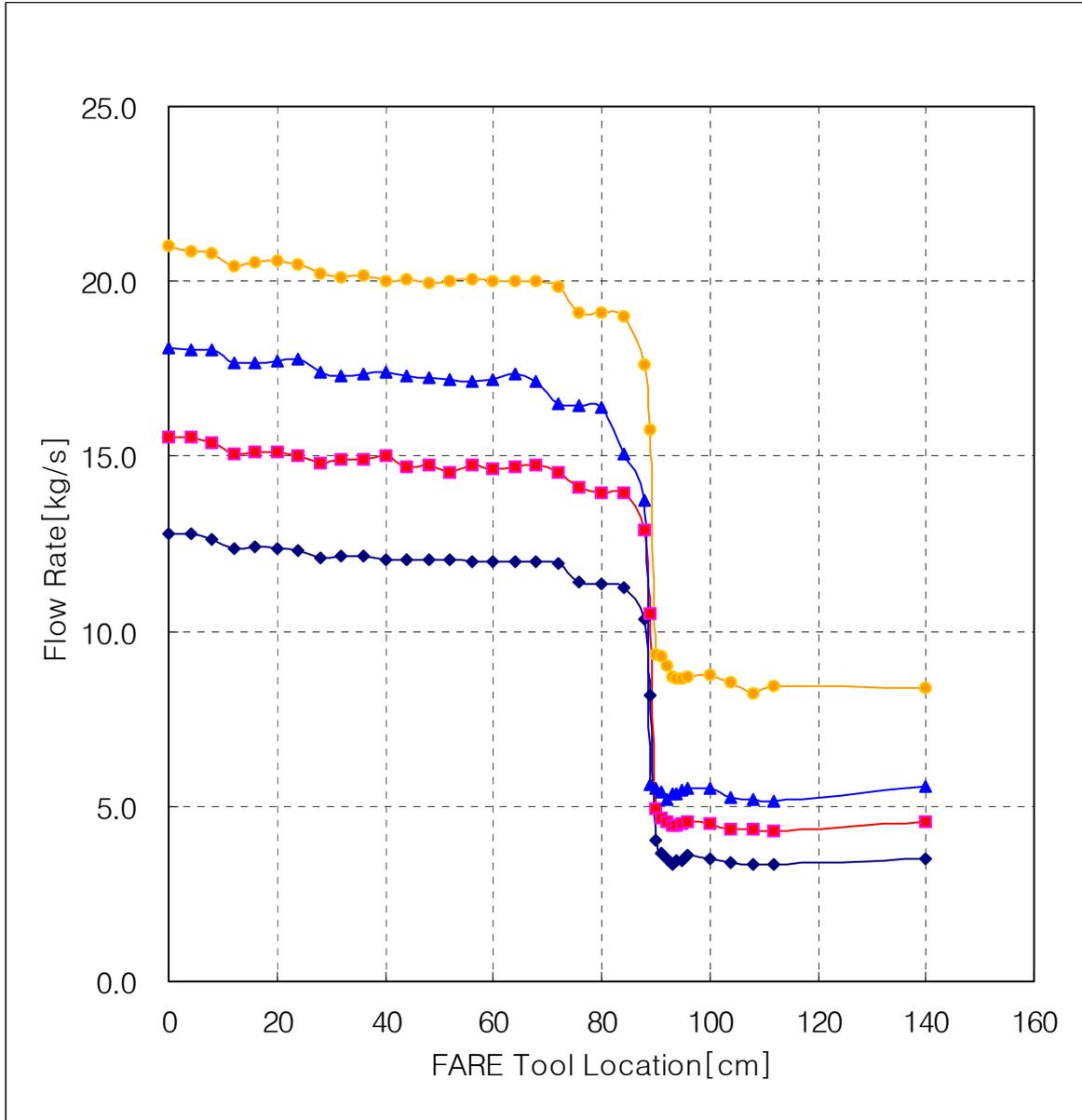
< 그림7 FARE 기구 성능실험 장치 >



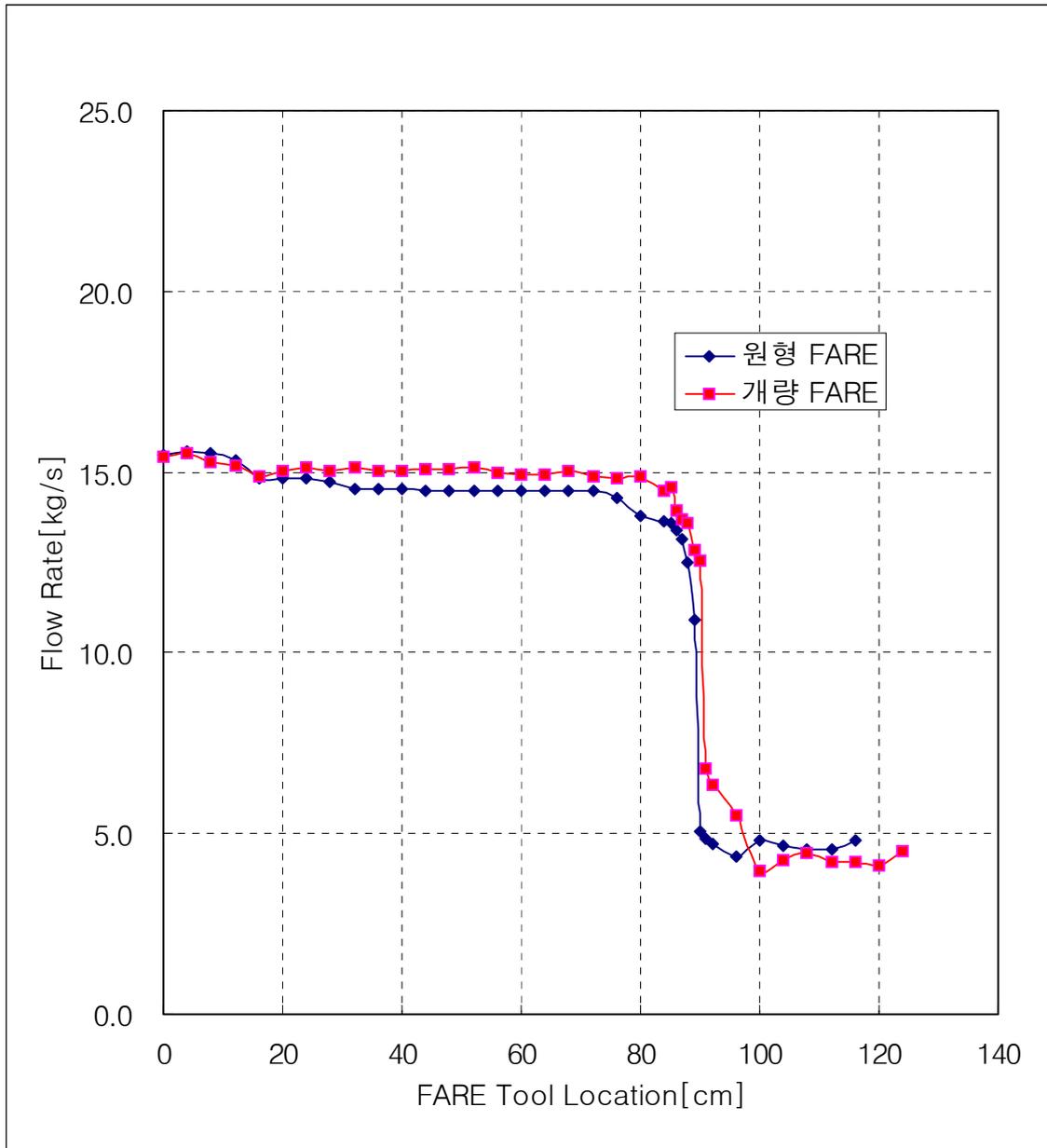
< 그림8 FARE 기구 실험 결과 >



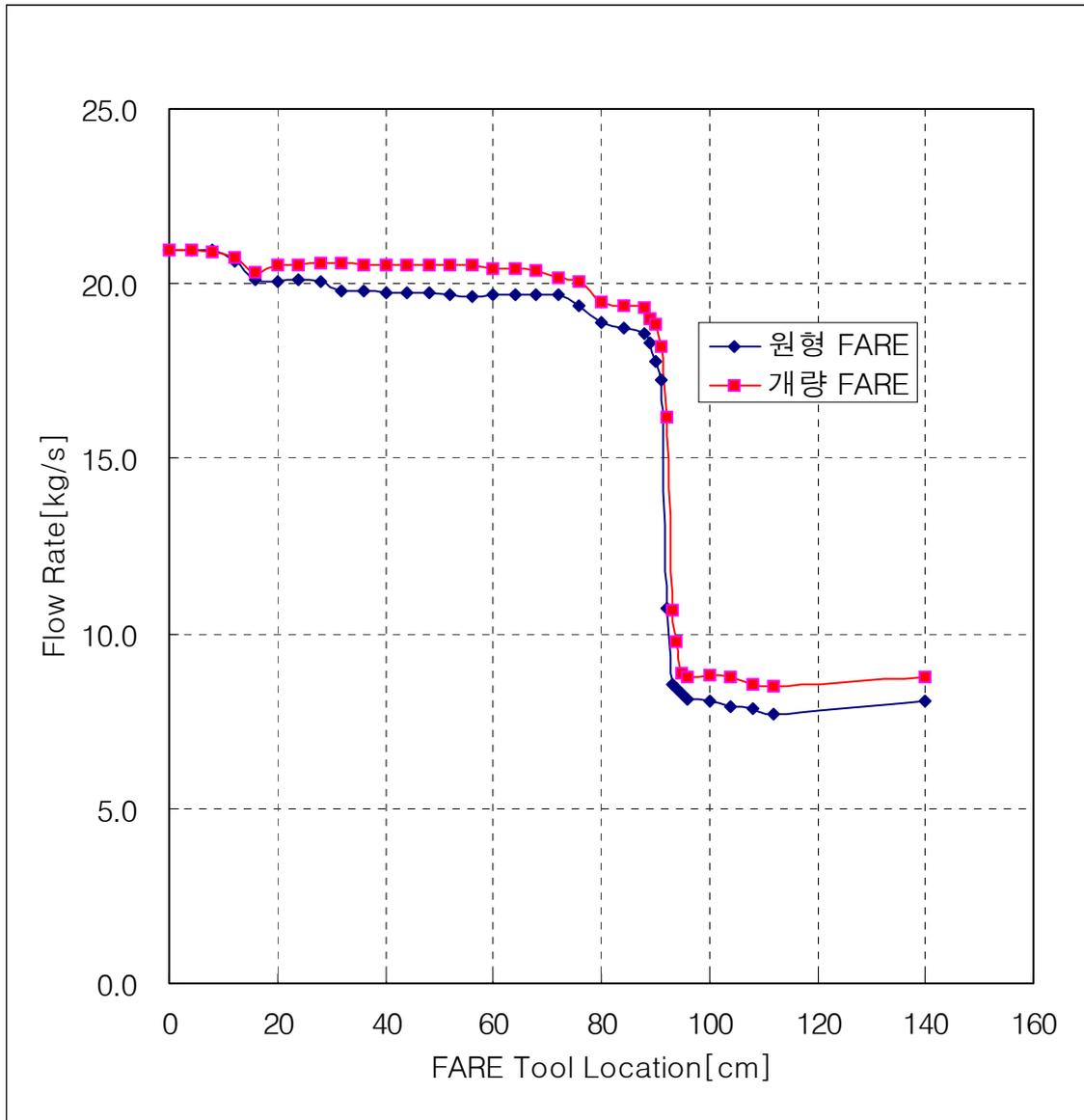
< 그림9 개량 FARE 기구 >



< 그림10 FARE 기구 선단(치차부 모양 변경) 변경시의 실험결과 >



(a) 초기 유량 16.0 kg/s



(b) 초기 유량 21kg/s

< 그림11 원형 대 개량형 FARE 기구 유량 변화 비교 >