

중수로 연료채널 내 전 핵연료 방출장치 (Defueling Device)의 개발 (모델링)

Development of Defueling Device for CANDU Fuel Channel (Modeling)

이정윤, 유기현, 양정승, 이현순, 장기종, 김영중
(GNEC기술사사무소)

이선기
(전력연구원)

Abstract

Commercial CANDU reactors use D₂O for moderator and heat transfer material and also have Fueling Machines(F/M) and related system equipment in order to assist on-power refueling operation. A Defuelling Device(DFD) is developed for the proper defuelling of all fuels in all fuel channels during shutdown condition of plant. This device is considered more efficient in defuelling compared to the existing Fuel Grapple System for its use of existing D₂O flow in the fuel channel. In this study, computational fluid dynamic software is used for optimize and evaluation of the design for its applicability.

요 약

현재 운전중인 CANDU 6형 원자력발전소는 감속재 역할과 동시에 열교환의 매개체로 중수(D₂O)를 활용하고 있다. 또한 운전 중에 연료 교환을 위한 핵연료 교환 설비와 여러 가지 관련 계통장비를 갖추고 있으므로 가동중 연료교환이 가능하다. 본 연구에서는 CANDU 6형 발전소의 연료를 모두 일시에 배출하기 위한 방법으로 기존에 사용하는 Fuel Grapple System Tool을 이용한 배출방법을 보다 효율적으로 개선하기 위해 정지상태의 작은 중수유량을 효과적으로 사용하여 압력관 내부의 연료를 배출하는 DFD (De-Fueling Device)를 개발하였으며 이론적인 해석을 통하여 그 활용여부를 판단하고자 한다.

key word : DFD(De-Fueling Device), 중수로, 중수(D₂O), 핵연료, 압력관,
오리피스 링, 감속재

1. 서 론

우리나라의 원자력발전소는 크게 중수로와 경수로로 나뉘어져 있다. 중수로의 경우 천연우라늄을 사용하고 있으며, 1차 냉각계통에 중수(D₂O)를 이용하여 감속재 역할을 함과 동시에 열교환의 매개체로 활용하고 있다. 중수로는 운전 중에 연료를 교환할 수 있는 특징이 있으며, 운전 중에 연료를 교환하기 위해 이와 관련된 핵연료 교환 설비와 여러 가지 관련 계통을 갖추고 있다.

운전 중 연료교체는 압력관내에서의 1차계통 냉각재의 유체흐름과 동일한 방향으로 유체의 유동힘을 이용하여 연료를 하류측으로 밀어낸다. 즉, 상류측에서 신연료는 연료교환기의 램 장치에 의해 압력관안으로 장전되며 냉각재 흐름방향의 유동저항력에 의해 하류측으로 흘러들어가게 된다. 사용 후 연료는 장전되는 신연료에 밀려 하류측 연료교환기의 매거진 내로 들어가게 된다.

운전 정지중에 연료를 배출하는 경우에는 중수유량이 매우 작아서 유동저항에 의한 연료배출이 어렵다. 이를 위해 현재 사용 중인 장비는 Fuel Grapple System으로서 운전정지 중에 압력관안의 연료를 메커니즘을 연료교환기가 여러 개 연결하면서 밀어낼 수 있도록 되어 있다. 그러나 여러 개의 장치들을 연료교환기가 연결하며 사용함에 따라 작업시간이 오래 걸리고 상호 연결부에서 여러 가지 문제점들이 나타날 수 있다.

본 연구에서는 발전소 정지 후 발전소의 수명완료 등에 따라 연료를 대량으로 방출하는 경우 상기와 같은 Fuel Grapple System을 활용하게 되면 많은 시간과 노력, 그리고 피폭양이 과다하게 발생할 수 있다는 점을 감안하여 완전 정지 후 대량 핵연료 배출을 위한 방법으로 작은 유량을 효율적으로 사용하는 DFD(De-Fueling Device)를 개발하기 위해 이론적인 해석을 실행하였다.

개발된 DFD의 활용은 예상 연료배출시간을 3개월에서 2개월 으로 약 1개월가량 효과적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 발전소의 운용시간을 증가시킬 수 있으며, 공기 단축 효과로 인해 유지보수에 따른 비용절감의 효과를 가져 올 수 있다고 평가된다.

또한 이러한 연료교환 장치들을 순수 국내기술을 통한 개발을 시도함으로써 비교적 취약한 중수로 관련부품의 국산화 기반을 구축할 수 있으며 아직도 해외에 많은 부분을 의존하고 있는 우리나라의 원자력관련부품 제작기술을 축적, 향상시키는데도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 기술동향

캐나다에서는 핵연료 채널내의 전체적인 연료배출 작업을 수행하기 위해 자체적으로 개발한 통합장비인 핵연료관 기계를 사용⁽³⁾하고 있다.

기존의 핵연료교환기(FM)에서는 하나의 채널당 핵연료를 제거하는데 여러 번의 반복 작업 때문에 많은 시간이 걸리게 되므로 이의 개선을 위해 AECL에 의해 통합장비가 개발되었다. 통합장비는 압력관안의 핵연료를 기계장치인 램을 통해 밀어내어 제거하는데 한번에 6-7개의 핵연료를 밀어낼 수 있어 단지 2번의 반복 작업만 필요하며 채널의 잠금 및 폐쇄 플러그를 제거하는데도 작업시간이 짧다. 또한 지지대재배치 작업동안에도 기존 핵연료 교환기와 동일한 기능을 수행한다. 또한 연료관 기계 튜브안의 핵연료를 통합장비의 램을 이용하여 지정된 압력관으로 되돌려보낼 수 있으며 압력관의 End Fitting 과 결합할 때 원활한 결합이 이루어질 수 있도록 설계되었다. 또한 핵연료의 부드러운 소통이 가능하도록 기계적인 정지장치가 설치되어 있고 핵연료관 기기와 통합장비사이에는 적절한 신호체계가 확립되어 있다. 그러나 하나의 시스템으로 구성되어 운전 및 관리, 설계, 제작이 안전등급으로 구성되는 등 매우 복잡한 형태를 띠고 있어 이의 유지 관리 차원에서도 막대한 비용이 소요된다는 단점이 있다. 이에 비해 GNEC기술사사무소에서 개발한 DFD는 압력관 내부의 기존 중수를 최대한 활용하여 연료를 일시적으로 배출하므로 보다 효율성이 높은 장점이 있다.

3. DFD 해석

개발된 DFD는 기존의 핵연료 교환기를 이용하여 원자로 운전 정지기간에 전체 압력관 내의 연료를 모두 방출할 필요가 있을 때 이용된다.

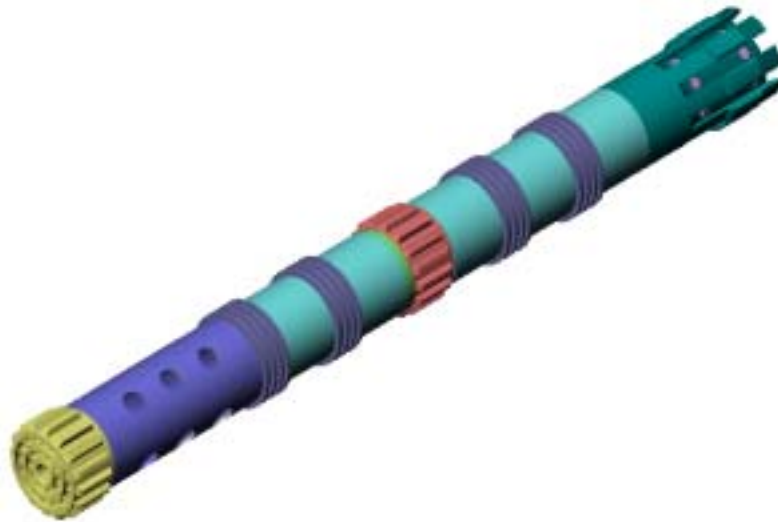


그림 1 개발된 DFD 모형

압력관내의 유체 유동력을 동력원으로 이용하여 적절한 유체저항을 갖도록 설계되

었으며, 그림1에서는 제작에 앞서 설계모형을 개발한 DFD를 보여준다.

3.1 유동장 개요

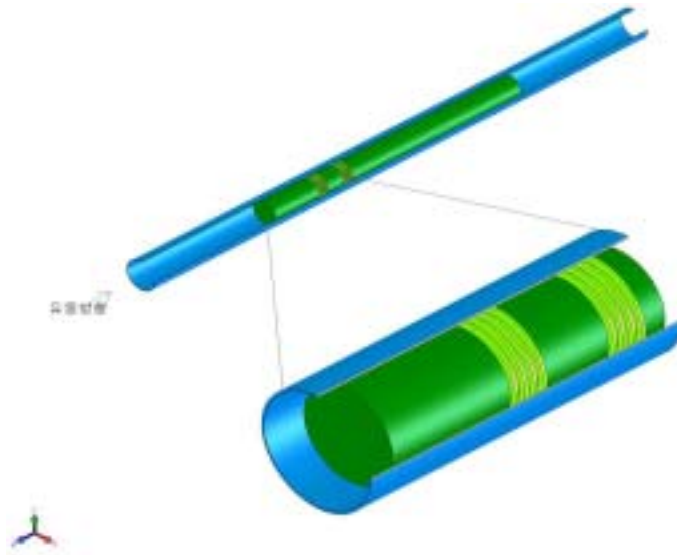


그림 2 핵연료 채널 및 DFD : 3D 도면

다음 그림 2는 핵연료 채널 내부의 DFD 모델을 나타낸 것이다.

상부에서 가압된 유체가 DFD를 채널 하부 쪽으로 밀면서 흐르기 때문에, DFD는 서서히 채널 하부로 이동한다. DFD의 이동속도는 유속에 비해서는 통상 무시할 수준이므로, 채널에 대해서 DFD는 정지하고 있는 것으로 가정할 수 있다. 채널 관의 크기에 비해서 DFD와 채널 사이의 간격은 매우 작아서(간격이 큰 경우 면적 비가 개략 10% 정도이며, 간격이 좁은 경우 면적 비는 약 3% 정도에 불과함), DFD와 채널 사이를 통과하면서 유속은 현격하게 증가하게 된다. 아울러 좁은 단면을 통과할 때에 유체의 마찰손실이 크게 발생하기 때문에 유동장의 압력 또한 이 부분에서 큰 폭으로 떨어진다. DFD 전후면의 전체 압력손실, 곧 압력차는 DFD에 미치는 유체의 마찰력과 밀접하게 상관되기 때문에, 유량변화나 설계형상의 변화에 따른 DFD의 이동속도 변화 등에 직접적인 영향을 준다.

3.2 해석방법

해석 공간에 해당되는 수치모델링 대상영역은 그림2에 나타낸 바와 같이 DFD 전·후단 50cm를 포함하여 유동영역으로 설정하였다.



그림 3 격자 계(DFD 주변)

비압축성 난류유동을 해석하기 위해 해석코드인 Fluent_6⁽⁴⁾를 사용하였다.

그림 3은 모델링에 사용된 격자계를 보여준다. 그림의 격자는 DFD 앞 부분과 링 홈의 일부 그리고 채널 관 사이의 유동장에 대한 격자점을 표시한 것이다. 우측 상단에 첫 번째 링 홈의 전부와 두 번째 링 홈의 일부가 나타난다. 유체가 링과 채널 관 사이의 좁은 간격을 지나면서 큰 마찰손실이 발생하고, 이 부근에서 유동구조 또한 복잡하게 발생하므로 충분한 해상도의 격자점을 이 지역에 배치하는 것이 중요하다.

3.3 해석조건

해석에 필요한 DFD 모델을 채널관의 크기, 링의 설치개수, 유량조건에 따라 도합 19가지 모델링 경우를 설정하였으며, 오리피스 형상에 따라 표1 과 같이 조건별로 나누어 분석하였다. DFD와 원형단면의 채널 사이의 간격과 DFD에 설치된 오리피스 링(ring)의 형상이나 링의 설치 개수에 따라, DFD 전후부의 압력손실이나 유동 형상 등을 수치해석적인 방법을 통하여 정량적으로 분석하였다.

표 1 모델링 조건 분류

유량 kg/s	넓은간격(W) 채널직경:107.4 링 직경:101.6				좁은 간격(N) 채널직경:103.4 링 직경:101.6			
	2	4	6	8	2	4	6	8
링수 2(D)	DW2	DW4	DW6	DW8	DN2	DN4	DN6	DN8
링수 1(S)	SW2	SW4	SW6	SW8	SN2	SN4	SN6	SN8

단) D=Doble ring, S=Single ring, W=Wide gap, N=Narrow gap,
홈없는 경우: ZSW2, ZSW8, ZW2

4.4 고찰

19가지 조건에 대해서 유동방향으로 정압(static pressure)의 변화를 그림 4에 나타냈으며, 압력의 단위는 파스칼(Pa)이다. 그림 4~7의 경우 압력분포로부터 압력이 급격히 감소하는 지점이 몇 군데 나타나며, 이러한 지점은 모두 유동단면적이 감소하는 위치이다. 유동을 따라 입구에서 출구방향으로 이동할 때, 급격한 압력감소가 처음으로 발생하는 지점이 유동단면적이 처음으로 감소되는 지점이다.

첫 번째는 X 좌표가 -50cm인 DFD 시작점 부근이며, 두 번째로 급격한 압력감소가 발생하는 지점은 링이 설치된 지점이다. 링이 2개가 설치된 경우(DW, DN) 두 군데에서 현격한 압력손실이 일어난다. 그림으로부터 압력감소의 정도는 DFD 입구보다 링 입구가 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 비록 단면적 감소 비율은 DFD 입구에서 더 크지만 압력감소량은 링 입구에서 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

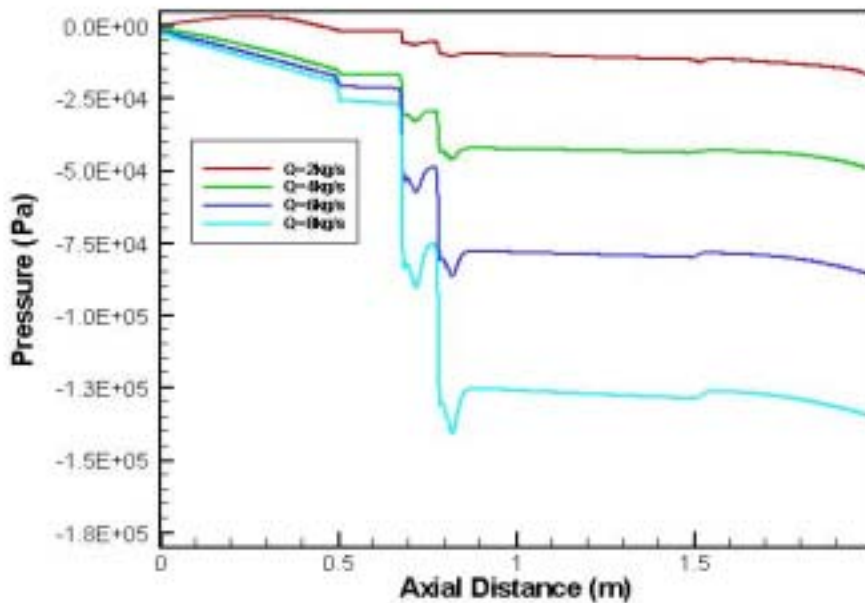


그림 4 DW 모델링: 축방향 정압분포

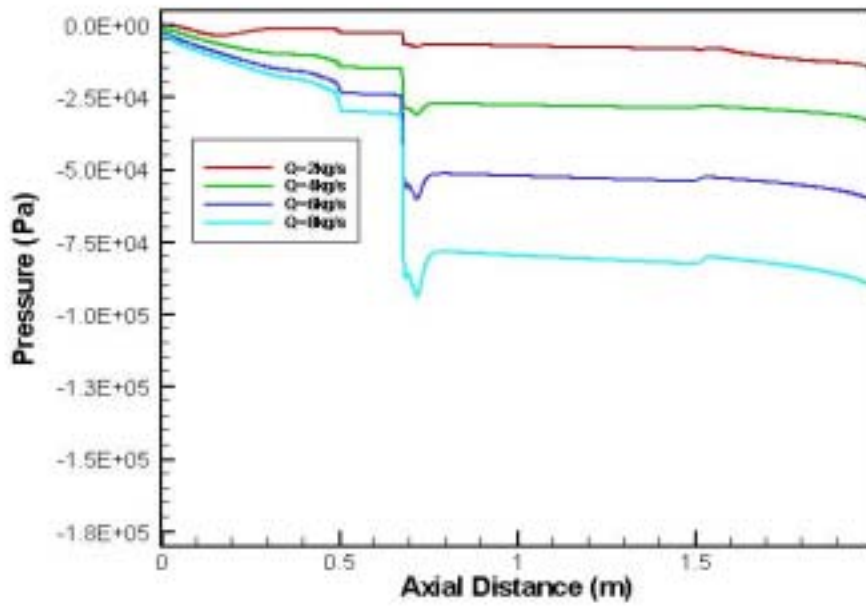


그림 5 SW 모델링: 축방향 정압분포

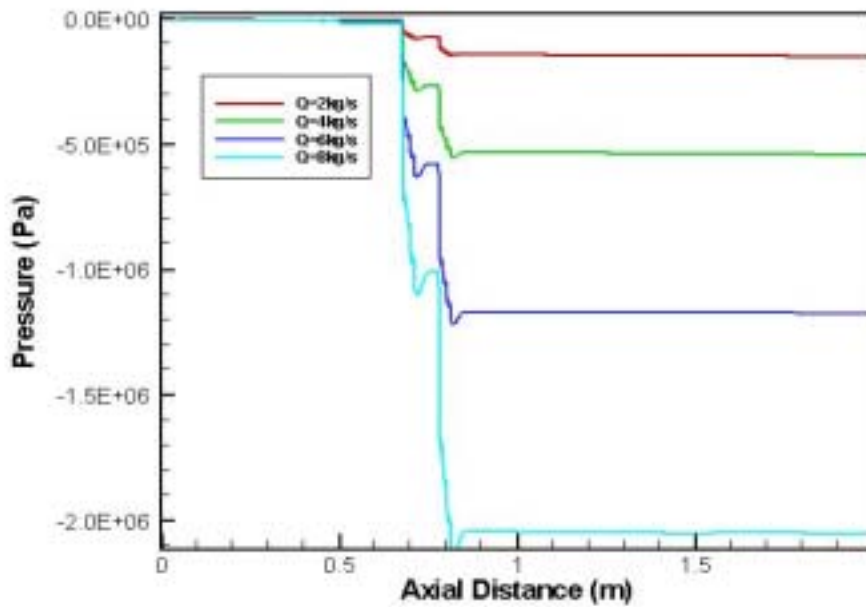


그림 6 DN 모델링: 축방향 정압분포

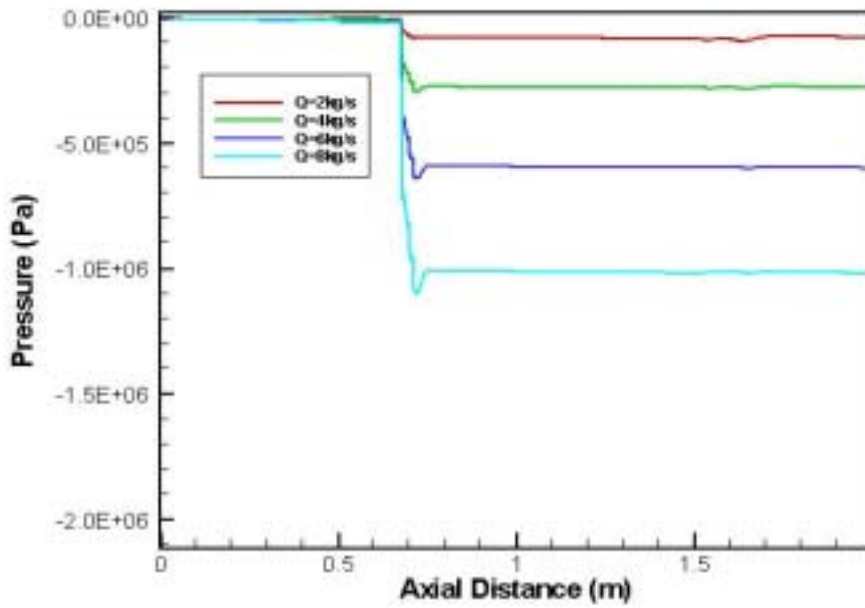


그림 7 SN 모델링: 축방향 정압분포

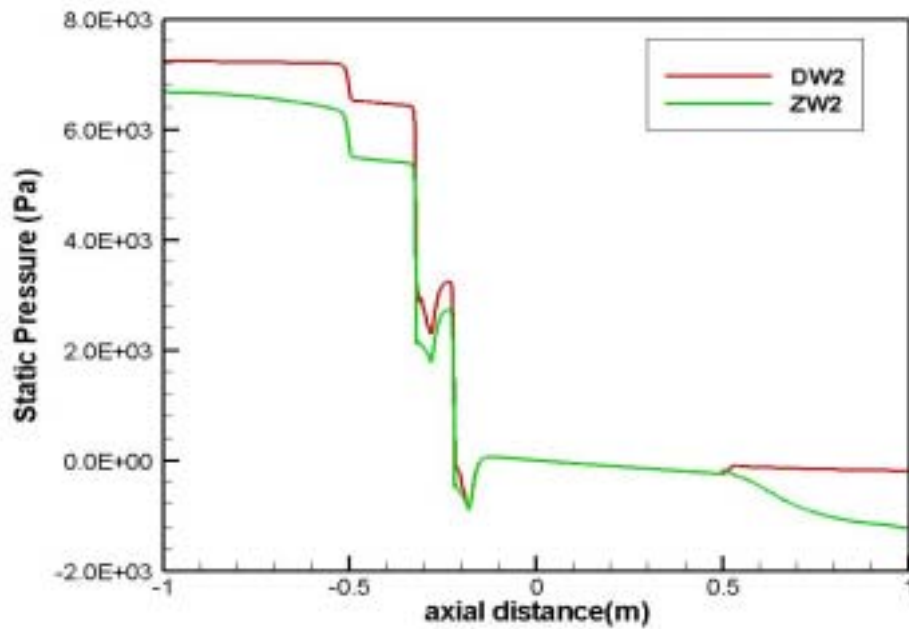


그림 8 DW2와 ZW2에 대한 축방향 정압분포 비교
(double ring, Q=2 kg/s)

그림 8은 링에 흠이 있는 경우와 없는 경우에 대해 압력분포를 비교한 그림이다. 흠의 유무를 제외한 나머지 유동 및 형상조건이 동일한 상황에서 축 방향 정압분포를 같은 그래프에 표시한 것이다.

결과를 종합해볼 때, 링의 위치에서 압력감소 경향을 비교해보면 링에서 흠의 효과는 별로 크지 않다. 특히 그림 8에서 두 번째 링의 경우 흠의 유무에 따른 압력 변화는 매우 미미하다. 링 전후에서의 압력손실은 결국 유체가 DFD를 밀어내는 힘과 직접적으로 관계 된다. DFD를 통과하면서 압력강하 폭이 크면 클수록 DFD를 밀어내는 유체의 힘이 커지게 된다. 특히, 링을 통과하면서 발생하는 압력강하에 대한 자료를 바탕으로 링의 개수와 링 표면에 흠의 유무에 따른 추진력에 대한 정보를 얻을 수 있다.

표 2 링 전후 압력강하

모델링조건		ΔP_1 (kPa)	ΔP_2 (kPa)
	ZSW2	3.9(1.0)	-
	ZW8	55.0(14.1)	-
	ZW2	4.9(1.0)	4.8
DW	DW2	5.0(1.0)	10
	DW4	17.5(3.5)	35
	DW6	40.0(8.0)	80.0
	DW8	62.5(12.5)	124.0
SW	SW2	5.0	-
	SW4	17.5	-
	SW6	40.0	-
	SW8	62.5	-
DN	DN2	80.0(1.0)	160.0
	DN4	280.0(3.5)	560.0
	DN6	600.0(7.5)	1200.0
	DN8	1000.0(12.5)	2000.0
SN	SN2	80.0	-
	SN4	280.0	-
	SN6	600.0	-
	SN8	1000.0	-

ΔP_1 = 첫 번째 링 압력강하, ΔP_2 = 두 번째 링 압력강하

(괄호의 숫자는 압력강하 량을 Q=2일 때의 압력강하 값으로 나눈 값)

표 2에서는 링의 개수에 따른 정압분포를 DW, SW, DN, SN에 대해 링 전후의 압력강하를 표시하였다. 그림 9, 10에서는 유량변화에 따라 DN, SN 및 DW, SW에서 변화되는 압력강하를 그래프로 나타내었다.

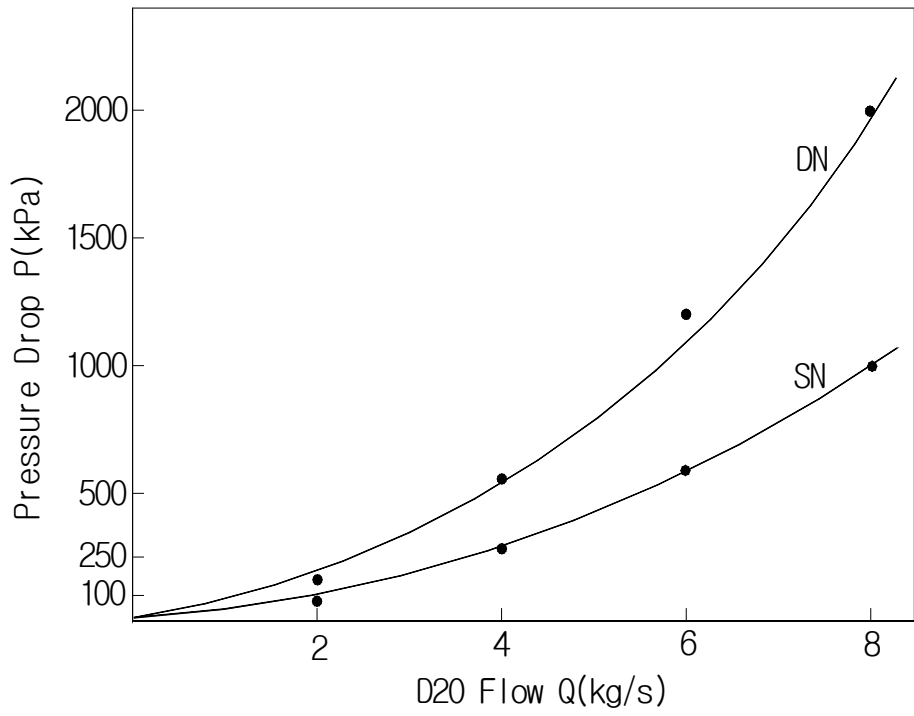


그림 9 유량에 따른 압력변화(DN, SN)

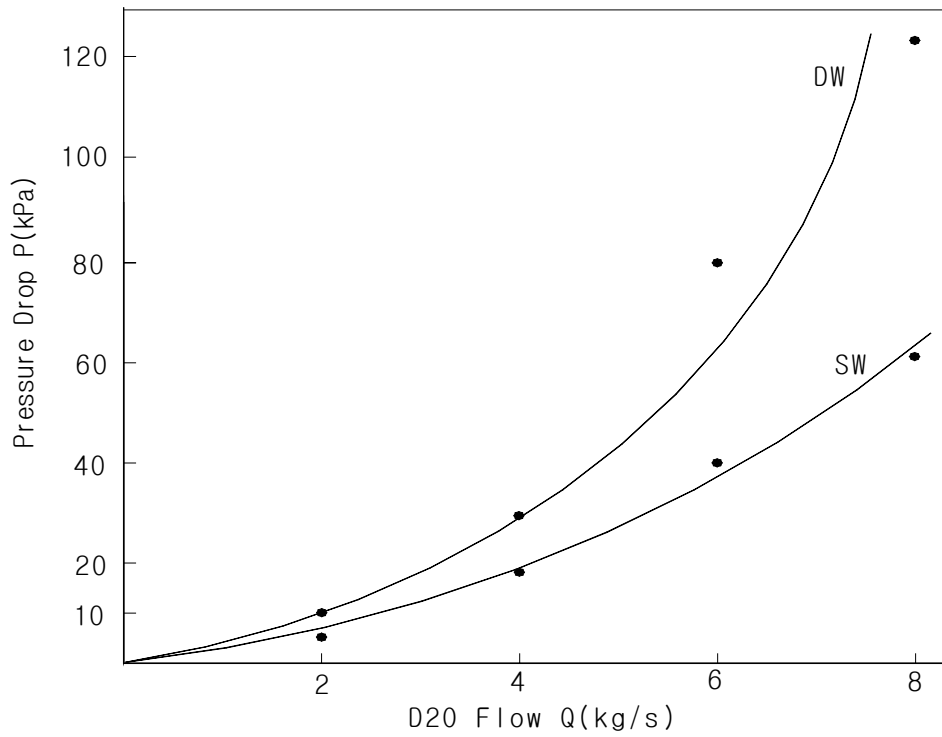


그림 10 유량에 따른 압력변화(DW, SW)

5. DFD 링 전후압력변화에 따른 최소중수 공급요건

앞에서의 모델링 결과를 이용하여 압력관 안에서 유량 변화에 따른 DFD에 작용하는 힘을 정역학적인 관점에서 구해보았다. 압력관 안쪽의 상류측 Separator와 하류측 Separator 사이에는 총 24개의 핵연료공간이 있으며, C-Ram이 중앙까지 전진하여 DFD를 밀어내어 연료를 빼내면 총 12개의 연료다발 중 2다발이 하류측으로 빠져나가고 DFD와 연료 10다발이 압력관안에 남게 된다. 그 이후로는 C램의 영향이 미치지 못하므로 DFD의 추진력에 의해서 연료 다발을 밀어내야 한다. 연료 10다발을 밀어내는 힘을 구하기 위해 연료 한 다발의 무게, 압력관과 연료다발과의 마찰력을 곱해서 추진에 필요한 힘을 구할 수 있다.

다음과 같은 가정 하에 계산에 필요한 조건을 수립하였다.

가정 1- Fuel Bundle 하나의 마찰계수는 일반적으로 $\mu = 0.6-0.68$ 로 알려져 있으며, 핵연료는 이동 중 간헐적 정지가 나타나므로 0.68의 정지마찰계수를 선택하였다.

가정 2- Fuel Bundle 하나의 무게는 23.7(kg)로 DFD도 같은 무게로 가정하였다.

Fuel Bundle 10개와 DFD 한개의 마찰력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$0.68 \times 23.7 \times 11 = 177.276(\text{kg})$$

연료다발 전체를 채널 밖으로 밀어내기 위해서는 위에서 구해진 힘 이상이 필요하다. 압력관의 유량이 4(kg/s)일 때(SN의 경우) DFD에 작용하는 힘을 정역학적인 관점에서 구해보았다. 모델링 해석으로부터 압력강하 ΔP 는 280(kPa)임을 알 수 있으며, 따라서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{압력 강하}(\Delta P) &= 280(\text{kPa}) \\ 280000/9.8(\text{kg/m}^2) &= 2.8571(\text{kg/cm}^2) \end{aligned}$$

(a) 유체가 DFD에 작용하는 힘(F_d)

채널 안 유체 유동력에 의해 단면적 D_o (10.16cm)인 DFD가 받는 힘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_d &= \Delta P \times \frac{\pi D_o^2}{4} \\ &= 2.8571 \times \frac{3.141592 \times 10.16^2}{4} \\ &= 231.6(\text{kg}) \end{aligned}$$

위로부터 DFD가 유체에 의해 받는 힘은 약 231(kg)정도임을 알 수 있다.

(b) String Drag Force

유량이 4(kg/s)일 때 유체 유동력에 의해 Fuel Bundle 하나가 스스로 끌려가는 힘을 약 4kg으로 가정하였다. De-Fuelling 과정에서 Fuel Bundle 10개, Device 1개 (연료 2개로 가정)가 유체의 흐름에 의해 끌려가는 힘은 다음과 같이 계산하였다.

$$12 \times 4 = 48(\text{kg}) \text{의 String Drag Force}$$

위로부터 유량이 4(kg/s)일 경우 연료 10다발을 미는 DFD가 필요한 힘 F_d 는 유체로부터 DFD가 받는 힘과 String Drag Force의 합과 마찰력의 차로써 다음과 같이 나타나게 된다.

$$231(\text{kg}) + 48(\text{kg}) - 177.3(\text{kg}) = 101.7(\text{kg})$$

따라서 유량이 4(kg/s)일 경우 약102kg의 여분의 힘이 나타나므로 DFD는 연료를 밀어낼 수 있다. 위와 같은 계산방법을 통하여 각각의 조건에 따라 DFD를 밀어낼 수 있는 힘을 구해 다음 표 3에 나타내었다.

표 3 DFD가 연료를 미는 힘과 마찰력과의 차(kg)

유량	DW	DDW (4개)	SN	DN
2(kg/s)	-145	-136	-87	-20
3(kg/s)	-125	-108	7	155
4(kg/s)	-100	-71	102	334
5(kg/s)	-80	-43	214	545
6(kg/s)	-39	27	391	887
7(kg/s)	-11	72	568	123
8(kg/s)	21	124	746	157

표3 에서 알 수 있듯이 굵은 선 안쪽에 있는 조건의 경우 DFD에 의해 압력관안의 핵연료를 하류측으로 밀어낼 수 있다. 발전소 정지 시 기본적인 유량 2(kg/s)에 순환모터에 의한 유량을 합하면 평균 7-8(kg/s)의 유량이 확보되므로 DFD에 의해 연료를 밀어낼 수 있는 힘을 얻을 수 있다.

6. 결 론

DFD 링의 개수와 홈의 유무에 따른 유체의 추력에 관련하여 이론적인 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동조건이 일정할 경우 링의 설치 개수와 DFD의 추력은 거의 정비례함을 알 수 있다. 링을 1개에서 2개로 늘일 경우 추력이 약 2배 증가하였다.
2. 두 번째 링의 존재 유무와 무관하게 첫 번째 링의 추력은 거의 일정하다. 링이 2개 설치된 DW의 첫 번째 링의 추력과 링이 1개 설치된 SW 링의 추력은 거의 동일하였다.
3. 유량의 증가에 따라 추력은 $\Delta P = C Q^n$ 의 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다.(단, $n=1.81 \sim 1.89$, C 는 유동형상계수)
4. ZW2와 SW2를 비교할 때, 링 표면에 홈을 추가하면 DFD의 추력은 약 10~20% 가량 미미하게 증가하였다.
5. 모델링 결과를 이용하여 조건별 최소 중수공급유량을 구한결과 DFD의 활용에 이상이 없음을 알 수 있었다.

본 논문을 위한 전산유체해석 수행에 도움주신 리우스(주)에게 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. FLUENT Inc., FLUENT 6.0: Technical Manual, 2002
2. I.Namgung, S.K.Lee, "Analysis of Channel Flow Low During Fuelling Operation of selected Fuel Channels at Wolsong NPP", JKNS, Vol34, pp502-516, 2002.
3. I.Namgung, S.K.Lee, Y.B.Kim, "FARE Device Operational Characteristics of Remote Controlled Fuelling Machine at Wolsong NPP", JKNS, Vol34, pp468-481, 2002.
4. AECL, "Fuel Handling System Design Manual(월성1호기)", 2003.