

## 중수로 Feeder배관 내부 유체 유동 해석

### Analysis for Internal Fluid Flow of CANDU Feeder Pipe

김 대웅, 이 경수, 홍 승열, 강 신철, 박 성근

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

본 연구의 목적은 중수로 feeder배관 내부의 유체 유동을 해석하여 순수 유체 유동 측면에서 feeder의 어느 부분에서 가장 많은 감육이 발생할 것인지 예측하는데 있다. 해석은 상용 전산코드인 FLUENT를 사용하여 여러 가지 feeder형상중 대표적인 5가지 형상에 대해 3차원 해석을 수행하였다. Feeder의 유체 유동 특성은 feeder의 geometry로 볼 때 크게 직관 유동과 곡관(elbow)유동으로 나누어지며 직관 유동의 경우 그 유동형태가 비교적 단순하나 곡관 유동의 경우 유동이 회전함에 따라 압력과 속도 분포가 변화하게 되고, 곡관부 난류 형태의 변화로 2차 유동(secondary flow)이 발생하는 등 유체 유동이 복잡해진다. 해석은 주로 곡관부의 유체 유동에 대해 관심을 두고 수행되었으며, feeder의 bending 각도와 길이에 따른 각 feeder 배관의 유체 유동 형태를 비교 분석하였다.

#### Abstract

The purpose of this study is to predict the most thinning part in feeder pipe of CANDU plant by internal fluid flow analysis. This study is performed 3-dimensional analysis for five types of feeder pipe using the commercial computation code, FLUENT. The characteristics of feeder flow depends on the feeder geometry. The flow of the elbow is much more complicated than that of the straight pipe, since the rotation of flow changes the pressure and velocity distribution in pipe and the change of the turbulence shape makes the secondary flow. The focus of this study is the analysis of elbow flow and the effect of the bending angle and pipe length for the five feeder types were analyzed.

#### 1.서론

캐나다의 Point Lepreau 원전과 Gentilly #2 원전에서 '95년, '96년도 발전소 정지기간중 Feeder 배관의(이하 feeder로 명칭) 두께를 측정된 결과 원자로 출구측 곡관부위가 예상보다 많이 감육되었음이 확인되었다. 이에 따라 캐나다원자력공사(AECL)에서는 운전중인 중수로 원전에 대해서 원자로냉각재자관 출구 곡관부에 대해 두께 측정을 권고하는 Information Bulletin 96-2를 발행하였

다. Feeder 감육의 원인으로는 Iron Dissolution Rate에 영향을 미치는 parameter와 Mass Transfer Rate에 영향을 주는 parameter로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. Iron Dissolution Rate의 주요 parameter는 운전온도, pH 등 수화학조건과 Cr농도 등과 같은 재질조건이며 Mass Transfer Rate에 영향을 주는 parameter는 Feeder배관의 bending 각도, 유체의 유속, steam quality, void fraction 등이 알려져 있다.

본 연구에서는 위에서 제시한 feeder의 감육원인중 배관 bending 각도와 유체 유속의 영향을 해석한 것으로 feeder의 geometry가 유체 유동 형태와 속도에 어떤 영향을 주고 그 결과 순수 유체 유동 측면에서는 feeder의 어느 부분에서 가장 많은 감육이 발생할 것인지 추정해 보았다.

## 2. 배관 곡관부 유체 유동의 이론적 고찰

Feeder의 유체 유동 특성은 feeder의 geometry로 볼 때 크게 직관 유동과 곡관(elbow)유동으로 나누어지며 직관 유동의 경우 그 유동형태가 비교적 단순하나 곡관 유동의 경우 유동이 회전함에 따라 압력과 속도 분포가 변화하게 되고, 곡관부 난류 형태의 변화로 2차 유동(secondary flow)이 발생하는 등 유체 유동이 복잡해진다.

### 2.1 이상 유체(ideal flow)의 유동

마찰에 의한 손실이 없는 ideal fluid의 경우 곡관부를 통과하는 동안 각 지점에서 균일한 에너지 분포를 가지며, 관내 어느 지점에서든 속도와 압력의 합은 같아야한다. 따라서 곡관부의 경우 원심력이 작용하게 되므로 바깥쪽은 원심력에 의해 반경 방향으로 압력이 증가하게 되고, 속도는 바깥쪽으로 갈수록 감소하게된다. [그림 1.]

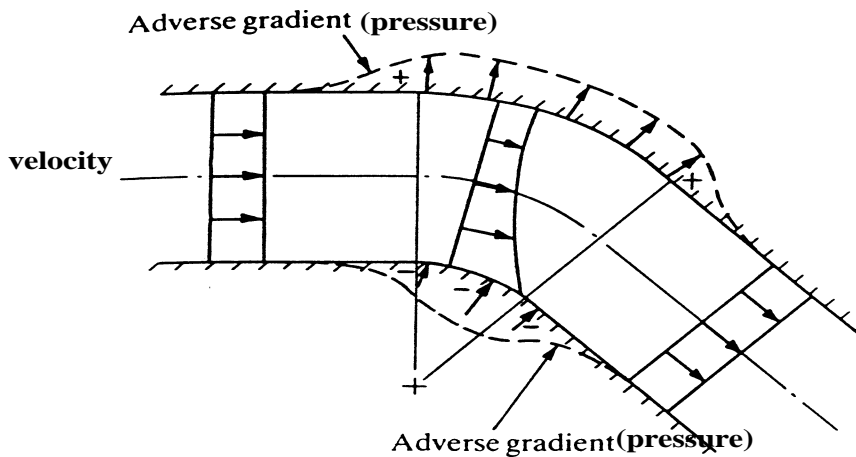


그림 1. 곡관부를 통과하는 이상 유체 유동

### 2.2 실제 유체(actual flow)의 유동

#### 2.2.1 곡관부 actual flow의 특성

actual flow에서 유동은 유체와 배관 벽의 마찰에 의해 벽면 부분의 유속이 가장 느리고 유동 중앙부분의 유속이 가장 빠르게 나타난다. 곡관부에서의 유동은 곡관의 안쪽(inner)과 바깥쪽(outer)에 미치는 원심력과 압력의 차이에 의해 유동 형태가 달라지는데 곡관부에서는 중앙의 유동이 원심력에 의해 바깥쪽은 집중됨으로 인해서 곡관부의 바깥쪽은 압력이 높아지며, 안쪽은 압

력이 낮아진다. 이러한 압력과 원심력의 상태에 영향을 받아 중앙부의 유동이 최초 진행방향으로 계속 진행이 되지 않고 바깥쪽으로 유동이 몰려가는 것을 유동의 굴절현상이라고 하고 곡관부의 각 부분(곡관부 입구, 중앙, 출구)은 압력차와 원심력의 상호 관계에 의해 해당 지역내에서 두 힘이 유동에 미치는 영향력의 크기에 따라 유동 형태와 유속이 바뀌게 된다. 곡관부의 geometry 특성에 의해 [그림 2.]에서와 같이 곡관부의 시작점에서 바깥쪽은 확산(Diffuser)현상이 발생되고, 안쪽은 저압 형성에 의한 유동의 흡입(Bellmouth Effect)현상이 발생된다. 바깥쪽은 유동 확산 (굽힘 각도가 급한 경우 와류 발생)에 의해 유속이 감소되며 안쪽은 유동 흡입에 의해 유속이 증가하게 된다. 이런 현상은 곡관부의 중앙을 지나면서 반전(reverse)되기 시작하는데, 즉 바깥쪽에서 bellmouth effect가 발생되고 안쪽에서 diffuser현상이 발생되어 유체의 유속은 바깥쪽이 빨라지고 안쪽은 느려지기 시작한다.

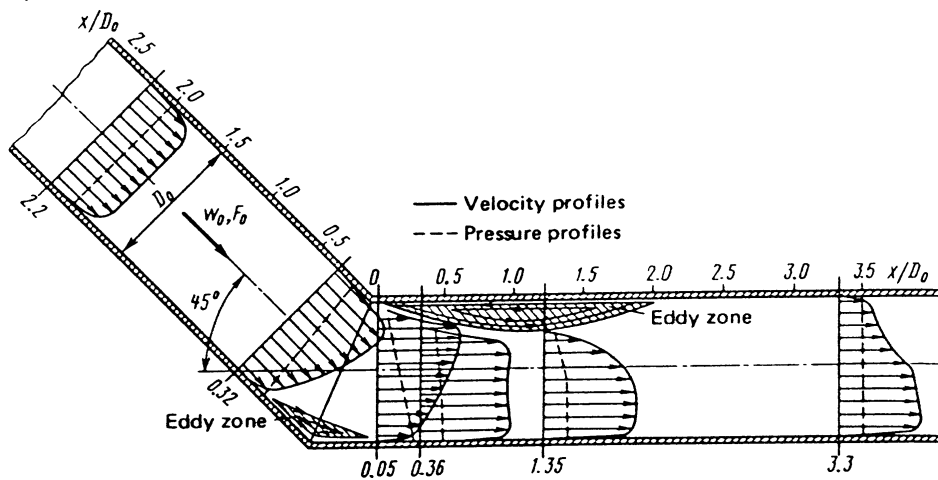


그림 2. 직관 및 곡관에서의 유동 분포

### 2.2.2 2차 유동 (Secondary flow)

곡관부에서의 diffuser 현상 및 bellmouth effect는 2차 유동(secondary flow)을 유발시키게 된다. 곡관부 바깥쪽의 일부 유동이 압력차에 의해 저압 지역인 곡관부의 안쪽으로 이동하게 되는데 이것이 곡관부에서 발생하는 대표적인 2차 유동(secondary flow)이며 곡관부 유동 형태에 매우 중요한 유동현상으로 작용한다.[그림 3.] Secondary flow가 곡관부의 안쪽으로 이동하는 과정에서 일부는 유동의 굴절에 의해 바깥쪽으로 향하는 중앙부의 유동과 혼합되어 이 지역의 유동을 복잡하게 만든다. 일반적으로 곡관부의 actual flow에서 유체 유동형태는 ideal flow와 차이가 나지만 압력 분포는 ideal flow와 거의 유사하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 곡관부의 굽힘 각도에 따라 압력과 원심력의 크기는 조금씩 달라지며, 유동 형태도 조금씩 달라지게 된다. secondary flow의 경우 굽힘 각도가  $80^\circ$  이상에서 약해지기 시작하여,  $130^\circ$  정도에서는 매우 약하게 발생하는 것으로 알려져 있다.

### 2.2.3 유동의 박리(Separation) 발생

곡관부 안쪽 중앙부의 경우 굽힘 경사가 급할수록 유체의 마찰에 의한 압력 손실이 크고 그 결과로 중앙부 바로 후단에는 유동의 박리(separation)가 발생되어 이 지역 유동의 정체와 순환 현상이 발생되며 이로 인해 중앙부 이후의 유속은 급속히 감소하게 된다.[그림 2 또는 4.] 그 영향으로 곡관부의 출구에서는 바깥쪽의 유속이 증가하고, 안쪽의 유속은 감소하게 된다. 유동 박리 현

상은 굽힘 각도가 급할수록 크게 나타나며 굽힘 각도가 완만할수록 그 크기가 작거나 발생되지 않는다.

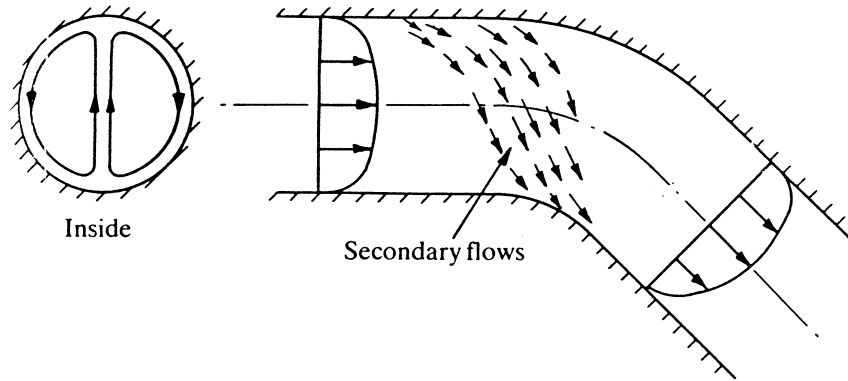


그림 3. Secondary Flow

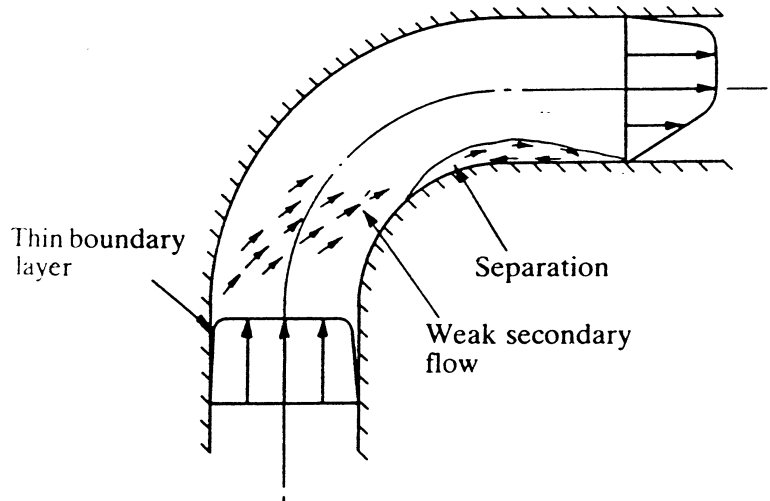


그림 4. 곡관부에서의 2차 유동 및 유동 박리 현상

### 3. 해석 방법론

#### 3.1 해석 대상 및 해석 방법

##### 3.1.1 Feeder 모델링

Feeder는 원자로 양쪽에 각각 380개씩 총 760개가 설치되어 있으며, 연료관과 원자로 모관을 연결한다. Feeder의 geometry는 동일하지 않고, 길이과 굽힘 방법, 각도 등이 조금씩 다른데, Bend Type에 따라 18종의 feeder로 구분할 수 있으며 feeder의 외경은 2.5inch 또는 2inch가 있다. 본 해석에서는 이 중에서 5개의 Bend Type에 대해 해석을 수행하였으며 상세한 자료는 [표 1.]과 같다. 선정된 5가지 모델은 feeder의 형상과 굽힘 각도, 1st bend와 2nd bend사이의 거리등을 고려하여 유동 형태가 달라질 가능성이 있는 모델로 선정하였다.

표 1. 해석 대상 feeder의 geometry parameters

Bend Type	Number of Feeders per Reactor	Bend No. 1 Angle (degree)	Bend No. 2 Angle (degree)	Distance between the Hub and 1st Bend(ft)	Distance between the 1st and 2nd Bend(ft)	Twist Angle (degree)	Pipe Nominal Diameter (in)
3	12	42.8	30.2	1.89	1.5	128.8	2.5
4A	20	73.1	70.0	0.6	0.98	146.38	2.5
5C	22	73.1	70.0	0.6	5.76	146.38	2.5
6	194	73.1	-	0.6	-	-	2.5
10C	2	73.1	70.0	1.2	6.84	146.38	2

### 3.1.2 격자 생성

해석은 5가지 feeder에 대해 3차원 실제 형상을 그대로 묘사하였다.[그림 5. ~ 9.] Feeder 배관과 연결된 모관은 해석 대상에서 제외하며, feeder의 시작 부분에서부터 1st bend 및 2nd bend와 그 출구까지를 해석 대상으로 하였다. 계산을 위한 격자는 배관 벽면에 집중적으로 배치하여 이 부분의 해석을 정밀하게 할 수 있게 했으며 배관 중앙부분은 일정간격으로 배치하였다. [그림 10.]은 feeder 곡관부의 격자 형태이며 [그림 11.]은 feeder 벽면 격자의 집중 배치 형태를 보여주고 있다.

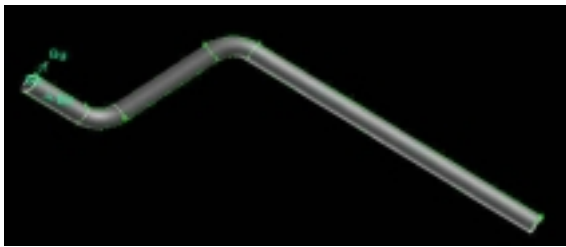


그림 5. Feeder Bend Type 4A

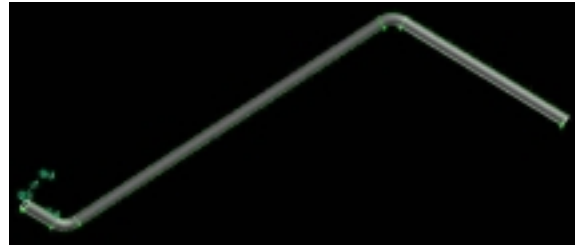


그림 6. Feeder Bend Type 5C

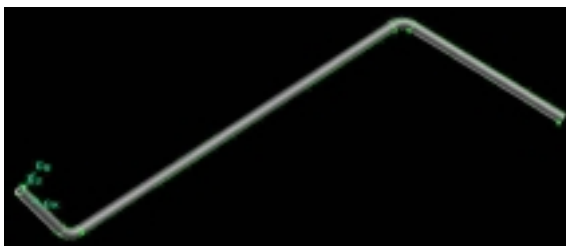


그림 7. Feeder Bend Type 10C

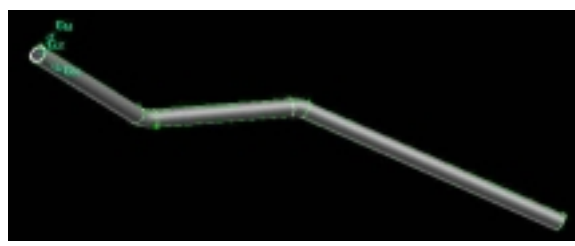


그림 8. Feeder Bend Type 3



그림 9. Feeder Bend Type 6

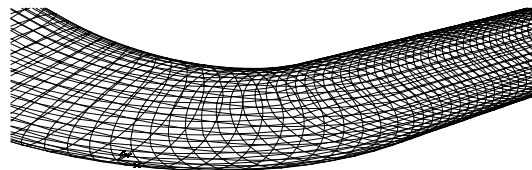


그림 10. Feeder 곡관부 격자 생성 형태

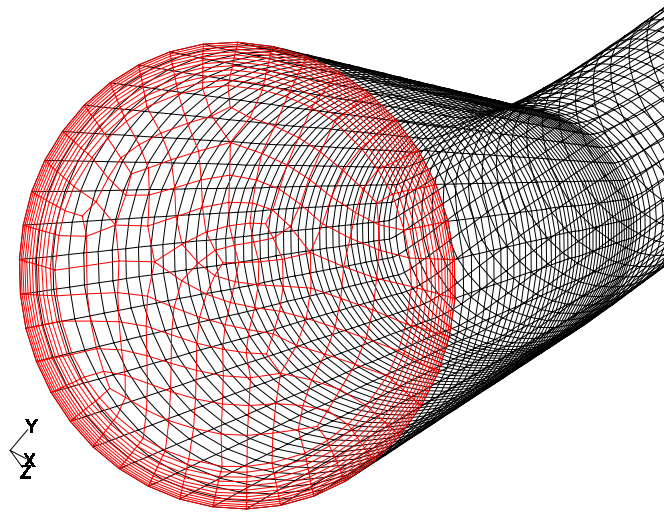


그림 11. Feeder 벽면 격자 집중 배치 형태

### 3.2 해석 방법

본 연구에서는 범용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석을 수행하였다. FLUENT는 현재 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 범용 열유체 해석 프로그램중 하나로 기본 수치해법은 유한체적법을 사용하며, 특성에 따라 유한차분법도 사용된다. 해석은 위에서 제시한 3차원 feeder에 대해 정상 상태(steady state) 유동해석을 수행하였다. 수치적 모델은 FLUENT에서 제공되는 모델중 완전 암시도해 (fully implicit scheme)을 사용하고 격자 보간법은 power-law법 사용하였다. 난류 모델은 곡관부의 유동이 어느 정도의 유동 굴절과 와류 현상이 발생할 것으로 예측하고 이러한 현상을 비교적 적절히 묘사하는 것을 알려진 RNG k-ε 난류모델을 사용하였다. 수렴판정은 각 시간 단계에서 다음의 전 영역 잔류항을 계산하여 해의 수렴여부를 판정하였다.

$$R = \frac{\sum_{nodesP} |[A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P]|}{\sum_{nodesP} |(A_P \phi_P)|} \leq 10^{-5}$$

즉 압력, 속도(U, V) 난류에너지 그리고 소산율(Dissipation)의 Normalized residual이 동시에  $10^{-5}$  이하로 떨어질 때 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

### 3.3 경계조건 및 입력 자료

경계조건 및 입력자료는 발전소의 정상 출력운전시의 조건을 사용하였다. Feeder 입구에서의 온도, 유속, 압력, steam quality등은 핵연료의 장전, 인출 및 시간에 따라 지속적으로 변화하기 때문에 이에 대한 평균적인 값을 구해야 한다. 본 해석에서는 주요 경계조건들을 국내 중수로 원전의 현재 주기에서의 운전상태를 “NUCIRC 코드”를 사용하여 분석한 결과를 사용하였다[참고문헌 1. 참조]. Feeder를 통과하는 유체는 고압/고온(10Mpa/306°C) 상태로서 액체상태를 유지하지만 일부 지역에서 기화에 의한 증기(steam)가 발생할 수 있다. NUCIRC 코드를 사용한 월성 1호기 feeder 출구에서의 건도(steam quality) 분석 결과 0 ~ 4.5%의 분포를 보이고 있었으며, 대부분의 경우 건도 3%이하를 유지하고 있어 feeder 내부의 유체를 완전 액체상태로 가정해도 해석 결과에 큰

차이가 발생하지 않을 것을 판단된다. 따라서 본 해석에서는 feeder 내부의 유체를 완전 액체상태로 가정하고 해석을 수행하였다.

표 2. Feeder 유체 유동해석 경계조건

Material(fluid)	fluid	water
	density(kg/m <sup>3</sup> )	700
	specific heat(J/kg · °C)	3316
	thermal conductivity(W/m · °C)	0.534
	viscosity(kg/m-s)	0.000835
	pressure(Pa)	10 <sup>4</sup>
	temperature(K)	579
Inlet(입구조건)	velocity(m/s)	14.5
	temperature(K)	579
	turbulence intensity(%)	5
	hydraulic diameter(in)	2.32
	pressure(Pa)	10 <sup>4</sup>
Outlet(출구조건)	pressure(Pa)	9.9 x 10 <sup>0</sup>
Wall(벽면조건)	heat flux(W/m <sup>2</sup> )	0

#### 4. 해석결과 및 고찰

해석에서 feeder는 연료채널에서 직각으로 분기되며 입구에서의 유속은 동일한 것으로 가정하였다. 결과 분석은 feeder배관의 곡관부를 편의상 입구, 중앙부, 출구로 구분하여 수행하였다.

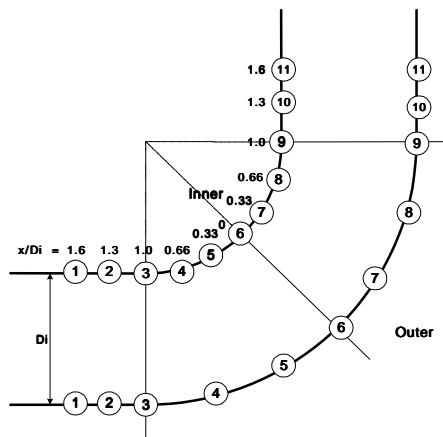


그림 12. 곡관부의 상세 구분

#### 4.1 곡관부 유동 및 유속 해석 결과 분석[그림 13. ~ 16. 참조]

##### 4.1.1 곡관부 입구에서 중앙부분까지(position 1 ~ 3)

Feeder의 시작점에서 곡관부 입구까지는 중앙부의 유속이 가장 빠르고, 배관 벽면의 유속이 느

린 일반적인 직관 유동의 형태를 보여주고 있다. 곡관부 입구에서부터는 앞에서 설명한 곡관부 유동 이론에서 설명된 secondary flow가 발생되기 시작하는 것을 볼 수 있다. 배관 중앙부의 유동은 유동방향을 계속 유지하려는 관성에 의해 중앙부로 계속 형성되지만, 일부 유동은 관성력에 의해 배관의 바깥쪽으로 향하게 되고 일부 유동은 곡관부 안쪽의 저압 지역으로 유동이 형성되기 시작한다.

#### 4.1.2 곡관부 중앙부분(position 4 ~ 8)

곡관부 중앙 부분에서는 diffuser 현상과 bellmouth effect가 발생하는 것을 알 수 있다. Bellmouth effect에 의해 안쪽 부분의 유속이 가장 빠르게 형성되는 것을 볼 수 있는데, 그 원인으로 는 곡관부 안쪽에서 유체와 벽면의 마찰에 의해 압력손실이 크게 발생하고 저압 지역이 형성되어 압력차에 의한 유체의 유속 증가현상이 발생된다. 이러한 유속의 증가는 매우 작은 부분에서 집중 되어 발생되며 그 범위가 넓지는 않다. 바깥쪽은 고압지역으로 안쪽에 비해 저 유속으로 유동이 형성되며 일부 유동은 곡관부 안쪽으로 secondary flow를 형성하는 것을 볼 수 있다. 벽면에서의 유속은 안쪽의 경우 position 5 또는 6에서 가장 빠르고 중앙 정점을 지나면서 유속이 급격히 저 하되는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 중앙 정점 이후 곡관부 안쪽에는 유동의 박리(separation) 부 분이 발생하게 되고, secondary flow의 유입으로 유동의 정체, 순환 현상에 의해 유속이 급속히 저하되는 것으로 판단된다.

#### 4.1.3 곡관부 출구부분(position 9 ~ 11)

곡관부 출구에서는 곡관부 안쪽과 바깥쪽의 유동 반전(reverse)현상에 의해 바깥쪽의 유속이 커 지기 시작한다. 안쪽의 경우 유동의 박리 부분을 벗어나 유속이 조금씩 증가되는 지역이며 출구를 벗어날수록 유속은 바깥쪽과 유사한 유속으로 회복된다.

#### 4.1.4 난류 및 압력 분포 분석

[그림 15.]은 feeder의 유체 난류 분포를 보여주고 있다. 난류는 유체의 유속과 비례관계가 있으 므로, 유속이 빠른 지역에서 난류가 크게 나타나고 유속이 느린 지역에서는 난류가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. [그림 16.]은 feeder의 압력분포 상태를 보여주고 있다. 곡관부 바깥쪽의 경우 원 심력에 의한 고압력 지역이 분포되고 안쪽의 경우 저압력 지역이 나타나며 곡관부 중앙부 바로 후단이 가장 낮은 압력을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 유동의 박리에 의해 발생하는 현상이며 곡관부 안쪽의 경우 이 지역에서부터 유속이 급감하는 것을 알 수 있다.

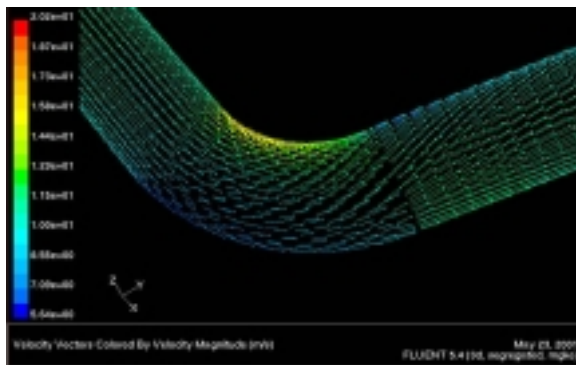


그림 13. Feeder 곡관부의 유동 해석 결과  
(1st Bend)

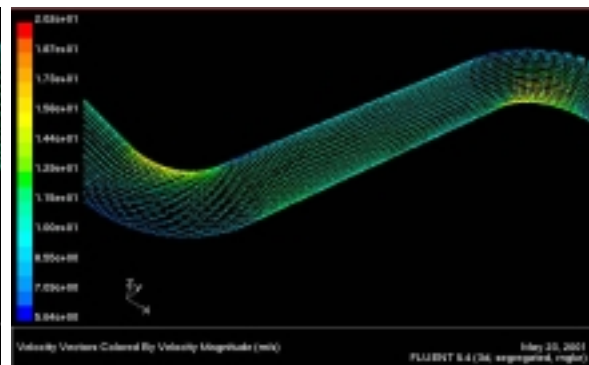


그림 14. Feeder 유동 해석 결과  
(1st bend와 2nd bend 사이)



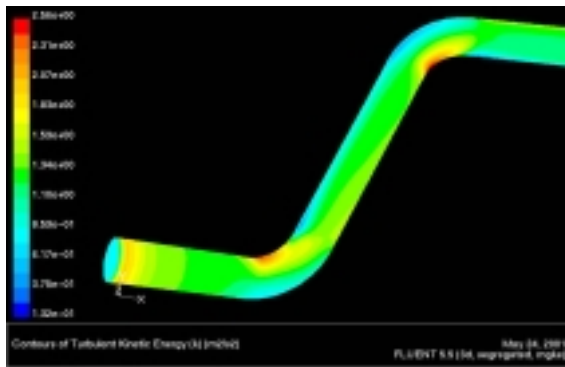


그림 15. Feeder의 유체 난류 분포



그림 16. Feeder의 압력 분포

#### 4.2 각 모델별 유동 및 유속 비교 분석

Feeder 중앙부의 유속은 최고 19 ~ 20m/s 정도이나, 벽면에서는 유체와 벽면의 마찰에 의해 속도가 감소하여 최고 속도의 경우 16m/s 정도이며 최저 속도는 4m/s까지 분포된다. 본 해석에서는 벽면에서의 유속이 중요하므로 feeder의 bend type별로 곡관부 벽면에서의 유속을 분석하였다. 해석 대상인 5개 feeder는 굽힘 각도 및 bend간의 거리등 형상이 조금씩 달라 유체 유동과 속도 분포가 약간씩 차이는 있지만 유속이 매우 고속인 난류 유동이며, 형상이 크게 다르지 않아 유동 형태와 유속분포가 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 즉 각 bend type별 동일 지역에 대한 유속의 차이도  $\pm 1.5\text{m/s}$  정도이며, 벽면에서의 최고 유속은 모든 bend type에서 동일하게 안쪽 ⑤번 지역에서 발생하였으며, 최저 유속은 바깥쪽 ⑤번 지역에서 발생하였다. 또한 중앙부를 제외하면 바깥쪽 ⑩번과 ⑪번 지역에서 유속이 가장 빠른 것을 알 수 있다. 그림 [17] ~ [21]는 속도분포를 각 bend type별 그래프로 나타낸 것이다.

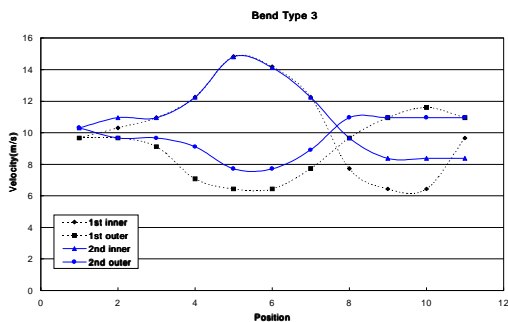


그림 17. 곡관부의 유속 분포(bend type 3)

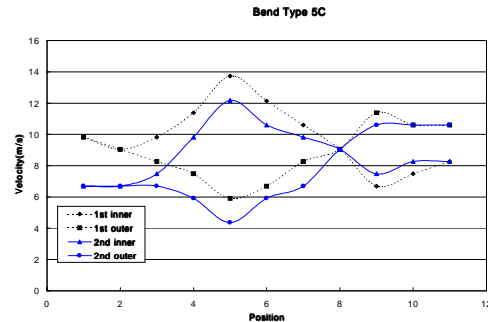


그림 18. 곡관부의 유속 분포(bend type 5C)

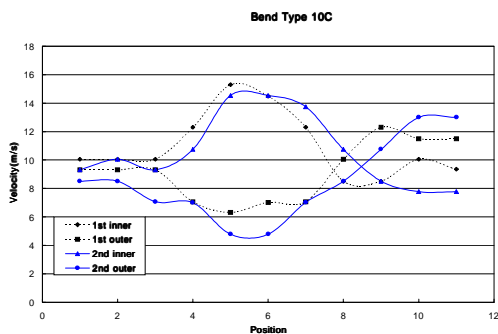


그림 19. 곡관부의 유속 분포(bend type 10C)

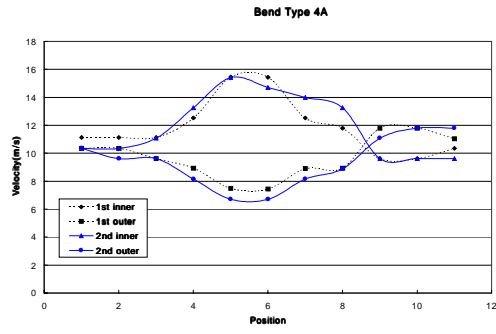


그림 20. 곡관부의 유속 분포(bend type 4A)

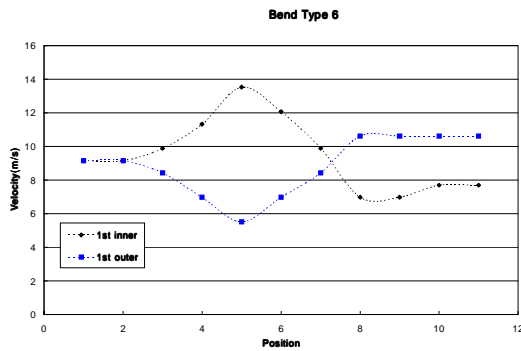


그림 21. 곡관부의 유속 분포(bend type 6)

## 5. 결론

Feeder의 5개 bend type별 유체 유동 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1) Feeder의 5개 bend type에서의 유체 유동 및 유속 분포는 상호 유사하다. 그 이유는 유체의 유속이 매우 빠른 난류 유동이며, 비록 feeder의 bend type과 형상에 약간의 차이가 있지만, 유체 유동 패턴이 심하게 변할 정도의 상호간에 특이한 형상 차이가 없기 때문인 것으로 판단된다.

2) 곡관부 유동 형태는 곡관부 형상 특성상 곡관부 바깥 중앙부의 경우 diffuser 현상에 의한 와류 발생으로 유속이 급감하게 되고, 곡관부 안쪽 중앙부의 경우 bellmouth effect에 의해 유속이 급증하게 된다.

3) 곡관부에서 유속은 안쪽 중앙부에서 최대 유속분포를 나타내며, 유체 유속의 영향만 고려할 경우 이 지역에서 feeder 침식이 가장 많이 일어날것으로 판단된다.

4) 곡관부 바깥 중앙부의 경우 압력은 증가하나, 유속은 감소하며, 출구쪽으로 갈수록 유속이 다시 회복된다. 따라서 곡관부 바깥 출구 지역이 유속 회복에 의해 유체에 의한 침식이 상당히 일어날 가능성도 있을 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

- [1] 중수로원전의 feeder배관 감속감시 기술 개발(중간보고서), TM.99NJ10.M2000.360, 2000. 9, KEPRI
- [2] 월성 1호기 feeder 두께감소 현황 분석 보고, TM.00NJ10.P2000.691, 2000. 12, KEPRI
- [3] Internal Flow Systems(2nd Edition), 1986, D.S.Miller
- [4] Handbook of Hydraulic Resistance(3rd Edition), 1994, I.E.Idelchik
- [5] FLUENT User's Manual, 1998, Fluent Incorporation