

◎ 논문

나선형 파형강관에서의 유동특성 및 압력강하 예측

Prediction of Flow Behavior and Pressure Drop of
Spirally Corrugated Steel Pipe

박 종 학*

Jong-Hark Park

Numerical investigation has been conducted to figure out flow behavior and pressure drop characteristics of spirally corrugated steel pipe which is widely used in civil, industrial and agricultural field owing to many advantages such as good corrosion resistance and durability, strength, easy and quick installation. Also the poly-ethylene coating spirally corrugated steel pipe has the long life under condition of sea water immersed. In the present study, flow behavior in the spirally corrugated pipe and influence of p/d_h (ratio of wave pitch to hydraulic diameter) to pressure drop are investigated by CFD with various Reynolds number. And also friction factor is estimated by pressure drop obtained by flow analysis. According to computation results, the flow runs spirally up and down along the spiral corrugation in the vicinity of wall, but the effect of spiral corrugation disappears in core region of pipe. As p/d_h becomes small, more pressure drop occurs in spirally corrugated pipe. Besides, friction factor augmentation becomes much larger as Re increases. In case of $p/d_h=0.38$, pressure drop and friction factor of spirally corrugated pipe are about four times larger than smooth pipe at $Re=1.46 \times 10^6$.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 나선형 파형강관(spirally corrugated pipe), 관마찰계수(friction factor)

1. 서 론

콘크리트 홈관을 대체하기 위해 개발된 파형강관은 기존 홈관에 비해 내식·내구성이 우수하며, 매설 후에도 외압강도에 강하여 파손위험이 적고, 시공이 간편하여 공사기간이 단축되며 공사비도 절감되는 장점뿐만 아니라, 최근에는 고강도 폴리에틸렌 수지가 피복된 파형강관이 개발되어 내화학·약품성까지 갖게 되어 해수에서도 장기간의 내구수명이 보장된다. 이러한 많은 장점으로 우리나라에서는 오·배수관, 관개용수관, 공업용수관 등 사용범위가 확대될 뿐만 아니라 수요도 점차 증가하고 있는 추세이다.

또한 내압특성이 향상되고 완벽한 수밀성을 보장하는 연결부 체결방법이 조만간 개발된다면 상수도 배관에까지 이용될 수 있을 것으로 예상된다. 파형강관을 이용한 배관설계를 위해서는 기존 배관설계에서와 마찬가지로 파형강관의 마찰계수와 같은 압력강하를 예측할 수 있는 자료가 요구된다. 하지만 근래의 연구[1, 2, 3]는 소구경 파형관에 국한되어 열전달기기에 응용하기 위한 것으로, 상수도나 오·배수관에 사용되는 대구경 파형강관에 대한 연구는 매우 찾기 어렵다. 실험적인 방법을 통해 다양한 형상변수를 갖는 대구경 파형강관의 수력학적 자료를 얻기 위해서는 대규모 설비가 요구되기 때문에 시간적으로나 경제적으로 많은 노력이 요구된다. 하지만 최근의 컴퓨터와 전산유체역학(CFD)의 발달로 실험적인 방법을 거치지 않더라도 상당히 신뢰할

* 2004년 2월 16일 접수

* 정회원, 한국원자력연구소 하나로운영부

만한 수준의 결과를 얻을 수 있게 되었다.

본 연구에서는 상용 전산유체역학(CFD) 코드인

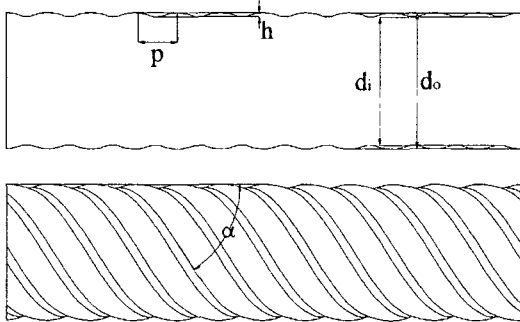


Fig. 1 Schematic of spiral pipe

Fluent를 이용하여 파형강관의 유동 및 압력강하 특성에 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상되어지는 나선파형의 피치를 변화시켜 가면서 여러 유량 조건에서 유동 해석을 수행하고 Reynolds 수에 따른 압력강하 특성을 알아보았다. 또한 계산된 압력강하로부터 관마찰계수를 예측하였다.

2. 해석모델 및 방법

본 연구에서 고려된 파형강관의 단면은 6개의 산과 골을 갖고 있으며, 이 단면이 회전하면서 축방향으로 이동하여 나선파형이 만들어진다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 파형강관을 설계할 때 파형의 피치와 깊이, 직경이 중요한 설계변수가 된다. 여기에서는 파형의 피치와 수렴직경의 비를 변수 p/d_h 로 설정하고, p/d_h 가 압력강하에 미치는 영향을 알아보기 위해, Table 1에서 보는 바와 같이 파형의 깊이를 9mm로 고정하고 피치를 변화시켜 4가지 p/d_h 에 대해 유동해석을 수행하였다. 모델링 된 파형강관 전체 길이는 p/d_h 에 관계없이 7m이다. 파형강관의 용도는 매우 다양하여 오페수관, 우수관, 농업 및 공업용수관등에 사용 가능하며, 유체가 관내부를 완전히 충만해서 흐르는 경우도 있지만 경우에 따라서는 개수로 유동과 같이 일부만을 채우고 흐를 수도 있다. 본 연구에서는 파형강관 내부가 우수 또는 상수로 충만되어 흐른다고 가정하고 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 유동해석을 위한 계산격자의 한 예를 보여주고 있는데, 계산격자가 파형강관 표면의 나선케적을 따라 형성되어 있음을 볼 수 있다. 계산격자

구성 시, 파형의 나선케적을 따라 격자를 나누었기 때문에 동일한 간격으로 격자를 생성하더라도 피치

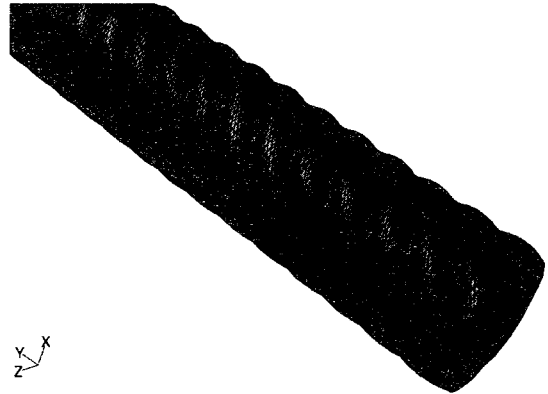


Fig. 2 Computational mesh for spiral pipe with $p/d_h=0.38$

Table 1. Dimensions of spirally corrugated pipe

No.	p(mm)	d_h (mm)	p/d_h	α
1	116.7	304.6	0.38	53°
2	133.3	"	0.44	48°
3	150.0	"	0.49	45°
4	166.7	"	0.55	43°

가 짧은 경우가 긴 경우에 비해 더 많은 계산격자를 필요로 한다. 계산격자는 피치에 따라 대략 60만개에서 90만개정도이다. 압력항과 속도항에 대한 처리는 SIMPLE 알고리즘이 이용되었다. 대류항을 이산 화하기 위해 1차 상류차분법을 사용하였다. 본 연구에서의 Reynolds수 범위는 모두 난류영역으로, 이러한 난류영향을 고려하기 위해 2-equation 모델 중 가장 대표적인 $k-\epsilon$ 모델이 도입되었다. 벽면 근처에서의 격자처리를 위해 흔히 사용되는 벽함수는 유동박리가 일어나는 경우 정확도를 보장하기 어렵다 [4]. 하지만 예비계산 결과, 벽면에서의 파형굴곡 변화가 완만하여 유동박리가 나타나지 않는 것으로 보여 벽함수를 적용하였다. 계산결과 수렴판정은 모든 계산영역에서의 잔류항의 총합이 10^{-4} 이하인 경우로 설정하였다.

입구에서의 경계조건은 질량유량으로 설정하였으며, 50 kg/s에서 400 kg/s까지 50 kg/s씩 증가시키면서 계산을 수행하였다.

3. 유동해석 결과 및 고찰

3.1 유동해석 결과의 정확도 검증

파형강관의 형상은 피치와 골깊이, 골의 형상, 내경 등에 따라 매우 다양하다. 따라서 본 연구에서

후, 기존에 알려진 관마찰계수에 대한 상관식과 비교하였다.

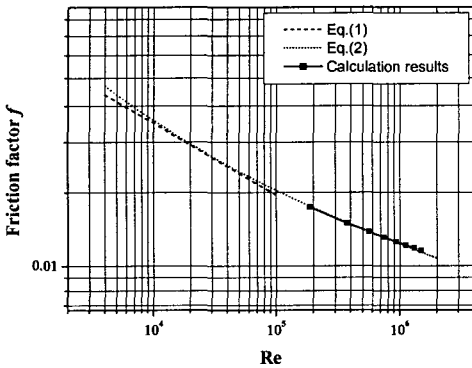
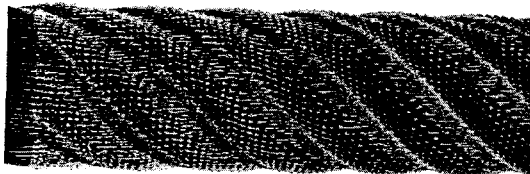
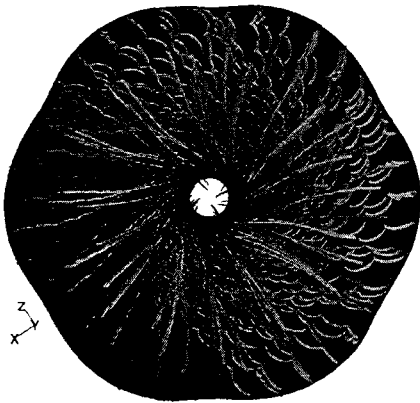


Fig. 3 Comparison of present computation results with correlations of friction factor for smooth pipe



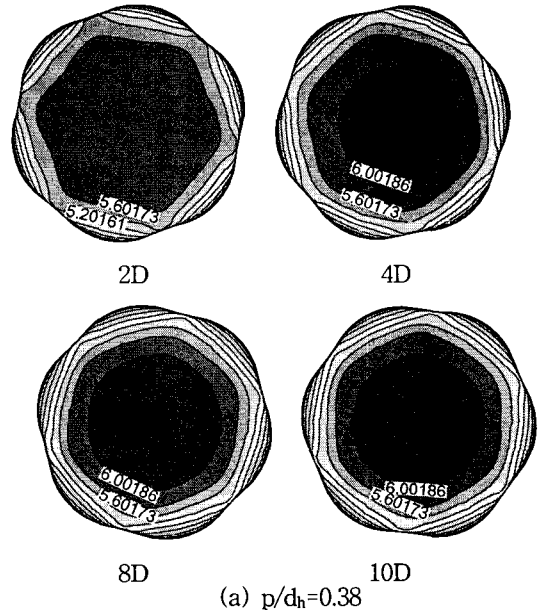
(a) velocity vectors



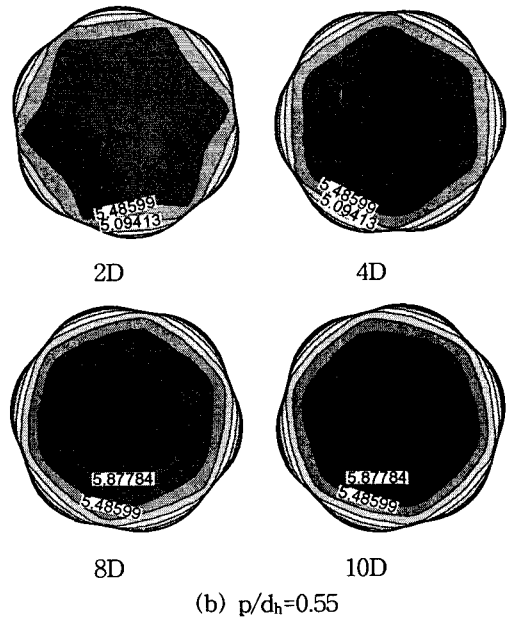
(b) flow path-line

Fig. 4 Flow behavior in the spirally corrugated pipe

만들어진 계산모델의 정확도를 직접 비교 검증할 수 있는 실험자료나 결과들이 없었다. 여기서는 파형강관에 대한 유동해석이 어느 정도의 정확도를 갖는지 알아보기 위하여 파형강관과 동일한 수력직경을 갖는 평활관에 대한 유동해석을 수행하고 이로부터 관마찰계수를 얻은



(a) $p/d_h=0.38$



(b) $p/d_h=0.55$

Fig. 5 Comparison of velocity contours with axial direction(m/s)

다음 식(1)은 가장 잘 알려진 Blasius공식으로 $4000 < Re < 10^5$ 범위에서 매끄러운 관에 대해 사용된다. $Re > 4000$ 의 범위에서는 식(2)가 더 일반적이다[5].

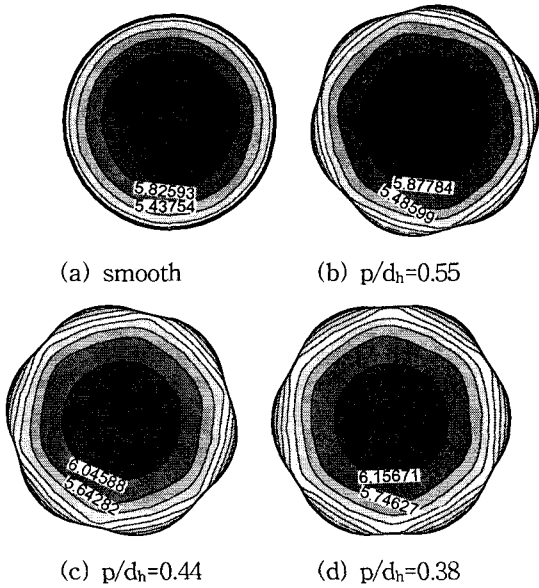


Fig. 6 Comparison of cross sectional velocity distribution at fully developed region (20D)

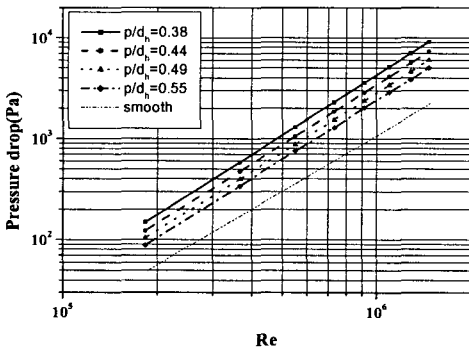


Fig. 7 Pressure drop vs. Reynolds number in log-log scale

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{(1.8 \log Re - 1.64)^2} \quad (2)$$

매끄러운 평활관에 대한 유동해석은 $1.87 \times 10^5 < Re < 1.49 \times 10^6$ 의 영역에서 수행되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 유동해석으로부터 얻어진 관마찰계수와 기존에 알려진 관마찰계수에 관한 상관식이 매우 잘 일치함을 보인다.

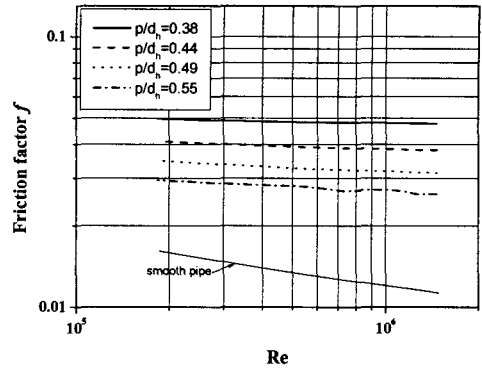


Fig. 8 Friction factors of spirally corrugated pipe

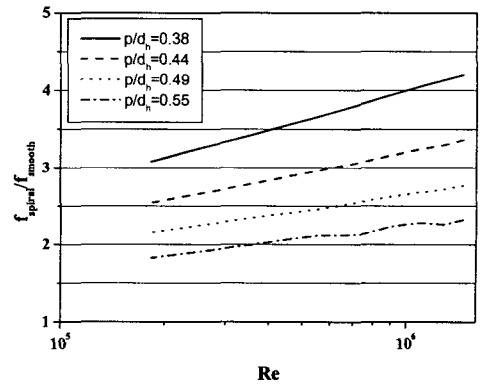


Fig. 9 Augmentation of friction factor

3.2 파형강관 내부를 흐르는 유체의 거동

파형강관 내부벽면 근처에서의 유동은 완전히 나선형의 파형을 따라 흐르기보다는 골에서는 나선형으로 이동하고 산에서는 관중심부를 흐르는 주유동의 영향을 받아 축방향으로 이동하여 (Fig. 4(a)), 전체적으로 보면 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 완전한 나선형 궤적을 그리면서 흐르는 것을 볼 수 있다. 하지만 중심부로의 유동은 주유동을 따라 거의 직선으로 흐르는 것으로 볼때, 나선파형 벽면에 의한 영향은 벽면에 인접한 영역에 국한되고 중심부까지는 그 영향이 미치지 못하는 것으로 보인다. 유동의 발달과정을 살펴보기 위해 Fig. 5는 유동이 관을 따라 흐르면서 변화하는 유속분포를 보여주고 있다. 피치가 긴 경우 ($p/d_h=0.55$)에는 10D 이후부터 유속분포의 변화가 없는 것으로 나타났지만 피치

가 짧은 경우($p/d_h=0.38$)는 8D이후부터 유속분포의 변화를 보이지 않는 것으로 보아, 피치가 짧은 경우에 유동의 발달이 더 빨리 이루어지는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 완전히 발달된 영역(20D)에서의 파형강관과 평활관의 유속분포를 보여주고 있다. 평활관은 벽면근처에서만 급격한 속도구배가 존재하며, 파형강관의 경우에는 파형의 골부분에서 저속영역이 형성되는 것을 볼 수 있는데, 파형강관의 피치가 작으면 작을수록 벽면근처의 저속영역이 관중심부로 확대되면서 저속영역이 넓어지게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 벽면의 파형피치가 짧을수록 벽면에 의한 영향이 중심부로 더 깊이 전달됨을 말한다. 이러한 이유는 피치가 긴 경우에는 주유동방향으로 골을 타고 넘는 유동보다는 골을 따라 나선형을 흐르는 유동이 더 지배적이지만, 피치가 짧아지면서 벽면에 대한 유동저항이 커지면서 벽면근처에서의 유동이 반대의 경향을 보이게 되기 때문이다. Fig. 6에서 보여주는 4가지 관은 모두 동일한 수력직경을 갖는데도 불구하고, 피치의 변화에 따라 단면 유속분포에서의 중심부 최고유속은 피치가 짧은 경우가 높고 피치가 긴 경우는 낮다. 이는 파형강관 벽면의 영향을 받는 유동에 의해 저속영역이 중심부로 확대되어, 유로면적이 작아지는 것과 같은 효과를 보이기 때문이라고 생각된다.

3.3 파형강관 피치변화에 따른 압력강하 예측

Re수의 변화와 압력강하의 관계가 Fig. 7에서 보여지고 있다. 파형강관도 동일한 Re수에서 평활관에 비해 훨씬 높은 압력강하는 나타내지만 Re수의 증가에 따라 압력강하도 선형적으로 증가하는 경향은 동일하다. 계산결과에서 얻어진 파형강관에서의 압력강하로부터 관마찰계수를 예측하고 이를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 비교대상으로 그려진 평활관에 대한 관마찰계수 곡선은 식(2)로부터 얻어진 것이다. 파형강관의 관마찰계수는 Re수가 증가함에 따라 완만하게 감소함을 볼 수 있으며, p/d_h 가 작을수록 관마찰계수는 증가한다. 본 연구에서 고려된 4가지 파형강관의 관마찰계수는 대략 0.025 ~ 0.04 사이를 나타내고 있다. 평활관 대비 파형강관의 관마찰계수의 증가량이 Fig. 9에 나타나 있다. Re수가 증가함에 따라 관마찰계수의 증가량도 증가하며, 피치가 짧을수록 증가하는 폭도 더 큰 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

전산유체역학적 방법을 이용하여 나선형 파형강관에서의 유체의 거동 및 압력강하특성을 알아보기 위한 시도를 하였다. 또한 유동해석으로부터 얻어진 압력강하량을 이용하여 관마찰계수를 예측하였다. 계산결과들을 분석하여 얻어진 것을 정리하면 다음과 같다.

파형강관 내부를 흐르는 유동은 벽면 근처에서만 파형의 영향을 받고 관중심부에는 영향을 받지 않는 것으로 보이며, 피치가 짧을수록 유동의 발달이 더 빨리 이루어지는 것으로 생각된다. 동일한 수력직경을 갖는 파형강관이더라도 피치가 긴 경우보다 짧은 경우의 중심부 최고유속이 더 높게 나타났다. 이는 파형골곡의 영향으로 인해 관 내부벽면 근처에서 형성되는 저속영역이 중심부로 확대되면서 마치 유로가 좁아지는 것과 같은 효과를 보이기 때문으로 보인다. 파형강관에서의 압력강하는 Re수에 선형적으로 증가하며, 파형의 피치에 따라 차이는 있지만 평활관에 비해 훨씬 더 높은 압력강하를 보인다. 파형의 피치가 작을수록 압력강하는 더 크며, 계산으로 얻어진 압력강하량을 이용하여 예측된 파형강관에 대한 관마찰계수는 평활관에 비해 2-4배이상 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] Vicente, P. G., Garcia, A., Viedma, A. (2004), Experimental Investigation on Heat Transfer and Frictional Characteristics of Spirally Corrugated Tubes in Turbulent Flow at Different Prandtl Numbers, *Int. J. Heat/Mass Transfer*, 47, pp. 671-681.
- [2] Webb, R. L. (1994) Principles of Enhanced Heat Transfer. John Wiley & Sons Inc.
- [3] Yang, D., Li, H., Chen, T. (2001), Pressure Drop, Heat Transfer and Performance of Single-phase Turbulent flow in Spirally Corrugated Tubes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24, pp. 131-138.
- [4] Fluent User's Guides, Fluent Inc.
- [5] Idelchik, I. E. (1996) Handbook of Hydraulic Resistance. 3rd Ed. Begell House.