

2025년도 해양공학 CAE 경진대회 결과보고서

팀 명:	EW-MARIN	부 문:	시뮬레이션
작품명:	입자-유체 연성 해석을 통한 침식-마모 저감형 해양 배관의 최적 설계 연구		
소 속:	홍익대학교 기계정보공학과	홍익대학교 기계정보공학과	홍익대학교 기계정보공학과
이 름:	이한진	엄태웅	김유빈
배경/ 목표:	<p>고압 가스관 내 블랙파우더에 의한 마모는 구조적 손상을 유발한다. 기존 마모 저감 구조의 한계를 보완하기 위해, 본 연구는 CFD-DEM 연성 해석을 통해 마모 저감 효과가 뛰어난 새로운 강선 구조를 제안한다.</p>		
개발 방법:	<p>SimLab과 EDEM을 활용해 CFD-DEM 연성 해석을 수행하였다. 유체는 정상 상태로 가정하고 Spalart-Allmaras 모델을 적용하였으며, 입자는 Oka 마모 모델을 기반으로 거동과 마모를 정량 분석하였다. 배관 굽힘각도와 꼬임비율을 변수로 설정하여 마모 특성을 평가하였다.</p>		
개발 결과:	<p>굽힘 각도 60°에서 마모가 가장 크게 발생했으며, 90° 기준 일반 배관 대비 제안한 강선 구조는 약 75%의 마모 저감 효과를 보였다. 기존 마모 저감 구조보다도 뛰어난 성능을 나타냈다.</p>		
결론/ 계획:	<p>기존 마모 저감 구조의 한계를 극복하고자 제안한 강선 구조는, 90° 배관에서 최대 75%의 마모 저감 효과를 달성하며 우수한 성능을 입증했다. 특히 꼬임비율 3에서 최적의 효과를 보였으며, 이는 구조적 안정성과 유지관리 측면에서도 높은 산업 적용 가능성을 보여준다. 향후 실제 실험을 통해 본 해석 결과를 검증하고, 양산 및 현장 적용을 위한 기술 개발이 필요하다.</p>		



# 서론

## 1. Introduction

### 1.1 연구 배경

천연자원이 특정 국가에 편중됨에 따라, 효율적인 운송이 필수적이다. 특히 천연가스는 선박보다 파이프라인 운송이 경제적인 수단으로 평가된다. [1번] 이러한 배경에서, Alaska Gasline Development Corporation(AGDC)이 추진하는 알래스카 LNG 가스관 사업은 높은 경제성을 바탕으로 주목받고 있으며, 알래스카산 천연가스를 한국과 일본 등 아시아 시장에 공급하기 위한 고정식 해저 파이프라인 구축을 목표로 한다. 완공 예정 시점은 2030년이다. [12번]

### 1.2 연구의 필요성

그러나 LNG 가스관 운반 과정에서 발생한 탄화가스 응축액은 모래, 먼지, 염분 등과 섞여 매년 수 톤의 불순물(black powder)을 생성하며, 이는 흐름을 따라 이동하면서 특히 굽힘 각도에서 내벽과 충돌해 국부 마모를 유발한다. [2번][3번] 이를 완화하기 위해 배관 내부에 트위스티드 테이프 구조물이 사용되었으나, 구조물 자체가 마모되며 오히려 유동을 방해하는 문제가 있다. [4번][5번] 특히 고정식 해저 배관은 매설 후 교체나 수리가 어렵고 비용도 크기 때문에 마모 구조의 신뢰성이 매우 중요하다. [6번]

### 1.3 연구의 목표 및 내용

본 연구는 가스 수송용 배관의 입자 마모를 정량 분석하고, 이를 바탕으로 효율적인 마모 저감 구조를 제안하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 (1) 굽힘 각도에 따른 마모 집중 각도 규명, (2) 90° 배관 기준 기존 트위스티드 구조의 한계 분석 및 개선안 설계, (3) 제안한 강선 구조의 꼬임비율에 따른 마모 성능 평가를 수행하였다. 해석 방법으로는 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)과 이산 요법(DEM, discrete element method)을 연성하는 시뮬레이션 기법을 활용한다. 이를 통해 유체 흐름의 특성을 분석하고, 입자-벽 충돌에 의한 국부적인 마모 집중 현상을 정량적으로 평가하여 구조적 설계 개선의 근거 자료를 확보하고자 한다.

## 본론

### 2. CFD-DEM 연성 해석

본 연구는 굽힘 파이프 내 입자 마모를 분석하기 위해 SimLab과 EDEM을 활용한 CFD-DEM 연성 해석을 수행하였다. 유체는 정상 상태 및 등온 조건으로 설정하고, 입자가 유동에 영향을 주지 않는다고 가정하여 일방향(one-way) 연성 방식으로 해석하였다. 이를 통해 계산 안정성을 확보하고 입자 거동 및 벽면 마모에 집중할 수 있었다.

#### 2.1 형상 및 스케일

알래스카 LNG 산업에서는 외경 1,067 mm, 두께 21.9 mm 의 API 5L Grade X70 탄소강 파이프가 사용되며, 이는 고압 가스 수송용으로 설계된 구조이다. 본 연구에서는 해석 효율성과 수치 안정성을 고려해 해당 형상을 10:1 로 축소한 모델을 시뮬레이션에 활용하였다. [10 번]

그림 1 은 파이프 형상 및 경계 조건을 보여준다.

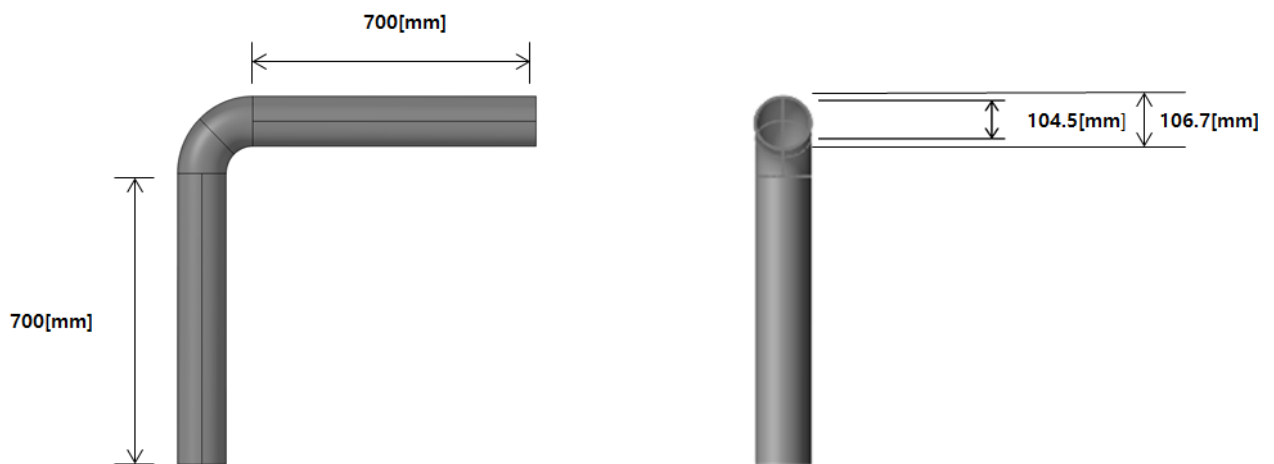


그림 1. 파이프 형상

표 1에 본 연구에서 사용된 파이프 재료의 주요 상태량을 정리하였다.

표 1. 배관 주요 상태량

Poisson's Ratio	Solid Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Shear Modulus [GPa]
0.3	7850.0	80.0

## 2.2 굽힘 각도(bending angle)와 꼬임비율(TR, twist ratio)

굽힘 각도와 꼬임비율은 유동에 영향을 주는 주요 형상 변수로, 굽힘 각도는 180도를 기준으로 한 관의 꺾임 정도를 의미한다.

그림 2는 굽힘 각도를 설명하고, 그림 3은 피치길이를 설명한다.

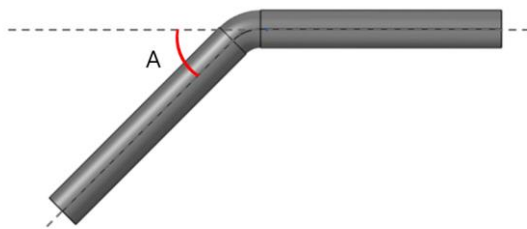


그림 2. A는 배관의 굽힘 각도

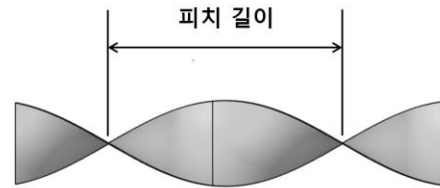


그림 3. 피치 길이의 정의

꼬임비율은 배관 내부에 설치된 나선형 구조물의 꼬임 정도를 정량적으로 나타내는 무차원 수로, 다음과 같은 공식으로 정의된다. [7번]

수식 (1)은 꼬임비율의 공식을 나타낸다.

$$TR = \frac{\text{피치길이}(pitch\ length)}{\text{배관 지름}} \quad (1)$$

여기서 피치 길이(pitch length)는 나선형 구조가 한 바퀴(360도)를 회전하는 데 필요한 축 방향의 거리이며, 배관 지름은 기준이 되는 유로의 직경이다. 꼬임 비율이 작아질수록 구조물의 꼬임이 더 조밀해지며, 유동 교란이 강해지는 경향이 있다.

## 2.3 CFD 해석 조건

유동 내 난류 강도가 낮은 점을 고려하여, 해석 시간을 절감하면서도 일정 수준 이상의 정확도를 확보하기 위해 Spalart–Allmaras 난류 모델을 적용하였다. [19번]

수식 (2)는 Spalart–Allmaras의 계산 식을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho\tilde{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \tilde{v})}{\partial x_j} = G_v - Y_v + \left(\frac{1}{\sigma_v}\right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{(\mu + \rho\tilde{\omega})\partial\tilde{v}}{\partial x_j} \right] + S_v \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도이며,  $\tilde{v}$ 는 난류 점성을 나타내는 보조 변수이다.  $U_j$ 는 유체 속도의  $j$ 번째 성분을 의미하며,  $G_v$ 는 난류 점성의 생성 항,  $Y_v$ 는 난류 점성의 소산 항이다.  $\sigma_v$ 는  $\tilde{v}$ 에 대한 프란틀 수(Prandtl number)로, 운동량 확산과 열 확산의 비율을 나타내는 무차원 수이다.  $\mu$ 는 동점성 계수,  $\tilde{v}$ 는 Spalart–Allmaras 모델의 주 계산 변수이며,  $S_v$ 는 외부에서 부가되는 소스 항을 나타낸다.

유체 같은 경우 본 연구에서는 LNG (liquefied natural gas) 를 사용하였으며, 이는 알래스카 LNG 사업과 유사한 조건에서의 입자 마모 현상을 분석하기 위함이다.

표 2는 본 해석에 사용된 유체의 주요 상태 량을 정리한 것이다.

**표 2. LNG의 주요 상태량**

밀도[kg/m <sup>3</sup> ]	점성도[pa · s]
76	1.5x10 <sup>-5</sup>

### 2.3.1 mesh 및 경계조건

CFD 해석의 정확도는 mesh 품질에 크게 좌우되므로, 본 연구에서는 유체가 흐르는 영역만을 추출하여 이를 중심으로 해석을 수행하였다. 유동 특성 파악을 위해 벽면 근처에 5층의 표면 mesh를 배치하고, 각 층의 두께는 10 mm로 설정하였다. 전체 영역의 평균 mesh 크기는 15 mm이며, 입구에는 평균 유속 10 m/s, 출구에는 정압 0 Pa의 조건을 적용하였다. [14번]

그림 4는 배관 내부 유체의 mesh 및 경계조건을 나타낸다. [16번][17번]

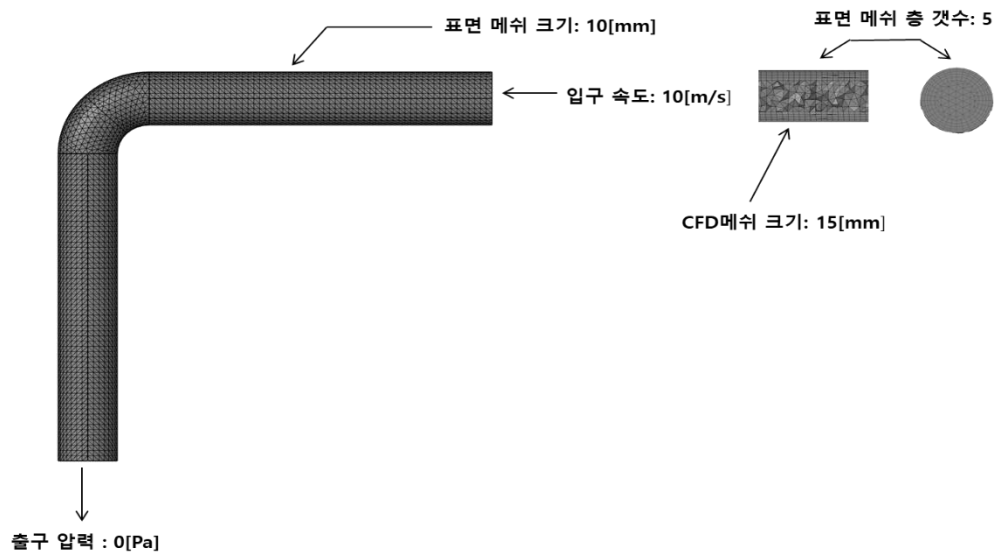


그림 4. 배관 내부의 mesh 및 경계조건

꼬임비율이 작아질수록 나선 구조는 더욱 조밀해지며, 이에 따라 해석 안정성을 확보하기 위해 mesh 밀도를 높게 설정할 필요가 있었다. 실제로 mesh를 촘촘히 구성한 결과 계산 수렴성이 개선되었고, 해석 결과도 허용 오차 내에서 안정적으로 수렴하였다.

표 3은 꼬임비율에 따른 mesh 조건을 나타낸다.

표 3. 꼬임비율에 따른 평균 mesh 조건

꼬임비율	6	5	4	3	2	1
레이어 수	5	5	5	5	5	5
표면 mesh[mm]	10	10	10	8	8	5
CFD mesh[mm]	15	15	15	10	10	8

2.4 DEM 해석

CFD 해석 후, 입자 거동과 마모를 정량적으로 분석하기 위해 CFD-DEM 연성 해석을 수행하였다. 해석 결과, 마모는 굽힘 각도 부근에서의 입자-벽면 충돌에 의해 주로 발생하였고, 마찰의 영향은 미미하였다. 이에 따라 충돌 특성이 강조되는 Oka 마모 모델을 적용하였으며, 관찰 시간은 0~2 초로 설정하였다.

초기에는 Archard 모델과 Oka 모델을 비교하였으나, Archard 모델은 접촉 압력과 미끄러짐만 고려해 충돌 각도나 속도 반영이 어려워 본 조건에 부적합하였다. 반면 Oka 모델은 충돌 속도와 각도에 따른 마모량 예측이 가능하고, 계산 효율성도 높아 본 해석에 적합한 모델로 판단되었다. [8번]

수식 (3)은 Oka 마모 모델의 수식이다.

$$W = K \times (\rho_p \div H) \times v^2 \times \sin^{\alpha(\theta)} \times \cos^{\beta(\theta)} \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 단위 충돌당 마모량,  $K$ 는 무차원 마모 계수,  $\rho_p$ 는 입자 밀도,  $H$ 는 벽 재료의 경도,  $v$ 는 입자 충돌 속도,  $\theta$ 는 입사각,  $\alpha$  및  $\beta$ 는 실험 기반의 보정 지수이다.

#### 2.4.1. 입자(black powder)

가스 파이프라인 운송 과정에서는 산화철, 황화철, 자철석, 실리카 등 금속 부식에서 유래한 미세 입자인 블랙파우더가 발생하며, 이들은 배관 내벽과의 반복 충돌로 국부 마모와 부식을 유발해 시스템 건전성에 영향을 줄 수 있다.

조성이 불균일한 블랙파우더의 물성은 주요 성분의 물리 특성에 가중 평균을 적용해 정의하였으며, 입자 밀도는  $4100 \text{ kg/m}^3$ , 전단탄성계수는  $52.75 \text{ GPa}$ , 포아송비는  $0.29$ , 입자 크기는  $0.25 \text{ mm}$ 로 설정하였다. [15번]

표 4는 블랙파우더의 구성과 평균 비율을 나타낸다.

표 4. 블랙파우더 구성 성분의 비율 추정 값과 상태량

구성 성분	비율(추정치)	포아송비( $\nu$ )	전단탄성계수( $G$ )
$\text{Fe}_3\text{O}_4$ (자철석)	60%	0.33	70
$\text{FeS}$ (황화철)	25%	0.28	25
$\text{SiO}_2$ (석영)	15%	0.17	30

수식 (4)는 입자의 평균 포아송비를 계산하고, 수식 (5)는 전단탄성계수를 추정하는 과정을 보여준다.

$$\begin{aligned} \nu &= (0.60 \times 0.33) + (0.25 \times 0.28) + (0.15 \times 0.17) \\ &= 0.198 + 0.07 + 0.0255 = 0.29 \end{aligned} \quad (4)$$

$$G = 0.60 \times 70 + 0.25 \times 25 + 0.15 \times 30$$

$$= 42 + 6.25 + 4.5 = 52.75 \text{ Gpa} \quad (5)$$

표 5는 블랙파우더의 상태량 추정치를 나타낸다.

표 5. 블랙파우더 입자의 주요 상태량 추정치

Poisson's Ratio	Solid Density[kg/m <sup>3</sup> ]	Shear Modulus[Gpa]	Radius[m]
0.29	4,100	52.75	0.25

## 2.4.2 상호작용

이산요소법(DEM)에서는 두 가지 상호작용을 고려한다. 입자와 입자 간 상호작용과 입자-벽(배관) 간 상호작용이다.

### 2.4.2.1 입자-입자 상호작용

입자 간 접촉 시 발생하는 법선 방향 접촉력  $F_n$ 은 Hertz-Mindlin 접촉 모델로 계산된다. [9번]

수식 (6)은 Hertz-Mindlin 모델의 수식을 나타낸다.

$$F_n = \frac{4}{3}E\sqrt{R}\delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

여기서  $F_n$ 은 입자 간의 법선 방향 접촉력을 의미하며,  $\delta_n$ 은 두 입자 간의 중첩 깊이,  $R$ 은 유효 반지름,  $E$ 는 유효 탄성 계수를 나타낸다. 이 수식은 입자 간 탄성 충돌 시 발생하는 비선형적인 접촉력을 정량적으로 계산하는 데 사용된다.

블랙파우더 입자-입자(Bulk-Bulk)의 경우, 충격 시 에너지 손실이 큰 성질을 반영하여 복원 계수(coefficient of restitution)를 0.3으로 설정하였으며, 입자 표면의 비정형성 및 미세 거칠기를 고려하여 정적 마찰 계수(coefficient of static friction)는 0.5, 구름 마찰 계수(coefficient of rolling friction)는 0.25로 설정하였다.



표 6은 입자와 입자 간의 상호작용에서의 주요 계수를 설명한다.

표 6. 블랙파우더 입자 간의 상호작용 주요 계수

Coefficient of restitution	Coefficient of Static Friction	Coefficient of Rolling Friction
0.3	0.5	0.25

#### 2.4.2.2 입자-배관 상호작용

입자-배관 상호작용은 배관 재질(API 5L X70 탄소강)을 기준으로 하되, 블랙파우더의 부착 특성과 탄소강 표면의 상대적 평탄성을 고려하여 복원 계수는 0.25, 정적 마찰 계수는 0.50, 구름 마찰 계수는 0.20으로 설정하였다. 석탄-강판 간 실험값과 비교하여 보수적으로 추정한 값이다. [13번]

표 7, 8은 상호작용에서의 주요 계수를 나타낸다.

표 7. 석탄 입자와 강판 간의 상호작용 주요 실험값 계수

Coefficient of restitution	Coefficient of Static Friction	Coefficient of Rolling Friction
0.22~0.52	0.31~0.38	0.24~0.35

표 8. 블랙파우더 입자와 배관 간의 상호작용 주요 추정 값 계수

Coefficient of restitution	Coefficient of Static Friction	Coefficient of Rolling Friction
0.25	0.5	0.2

### 3. 실험

다음은 본 연구에서 수행한 해석 절차에 관한 설명이다. 우선, 기본 배관 형상에 대해 굽힘 각도별로 마모량을 조사하였다. 이후, 기존의 마모 저감 구조인 트위스티드 테이프 구조와 본 연구에서 새롭게 제안한 구조 간의 마모 특성을 비교하였다. 마지막으로, 새롭게 제시한 구조에 대해 꼬임비율(twist ratio) 값을 달리하여 마모량을 비교 분석하고, 이를 바탕으로 최적의 마모 저감 구조를 도출하였다.

#### 3.1 굽힘 각도에 따른 마모량 비교

본 연구는 굽힘 각도 90°, 75°, 60°, 45°의 배관을 비교하여 입자 충돌로 인한 마

모가 집중되는 각도를 분석하고, 산업 설계에서 피해야 할 곡률 조건을 제시하고자 하였다. [11번][18번][20번]

그림 5, 6, 7, 8은 배관의 CFD 해석 결과를 나타낸다.

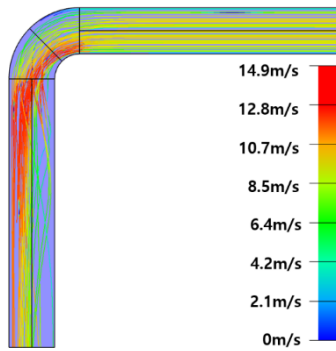


그림 5. 굽힘 각도 90° CFD 해석

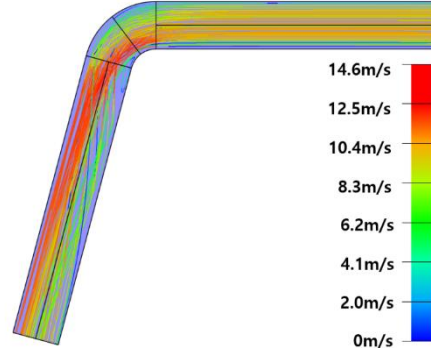


그림 6. 굽힘 각도 75° CFD 해석

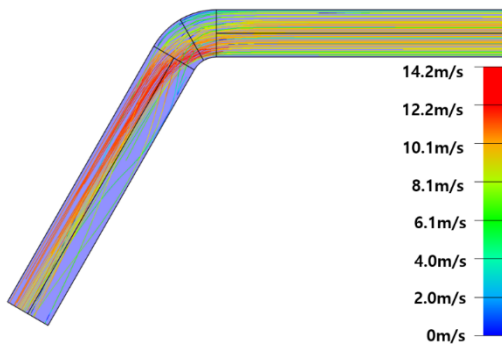


그림 7. 굽힘 각도 60° CFD 해석

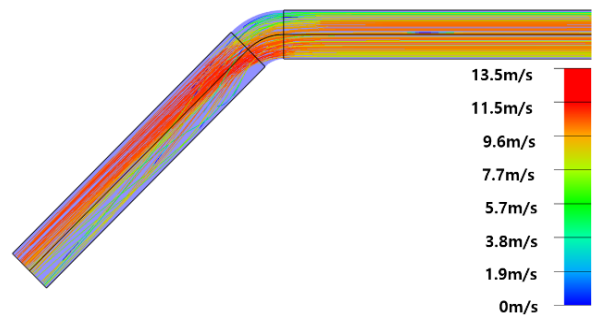


그림 8. 굽힘 각도 45° CFD 해석

그림 9, 10, 11, 12는 굽힘 각도 별 CFD-EDM 연성 해석 결과를 나타낸다.

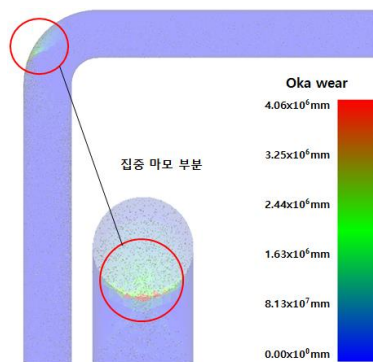


그림 5. 굽힘 각도 90° DEM 해석

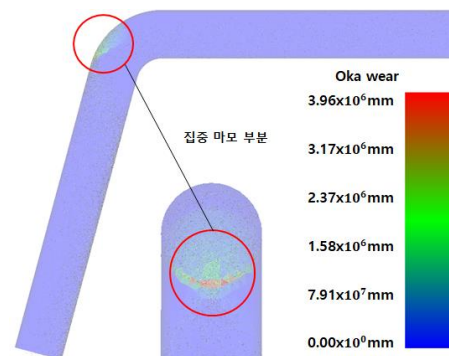


그림 6. 굽힘 각도 75° DEM 해석

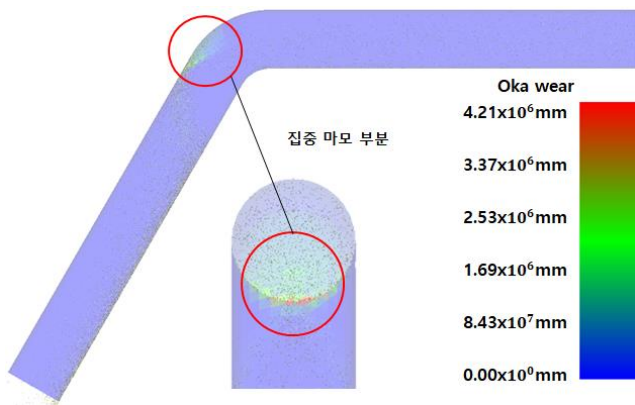


그림 7. 굽힘 각도 60° DEM 해석

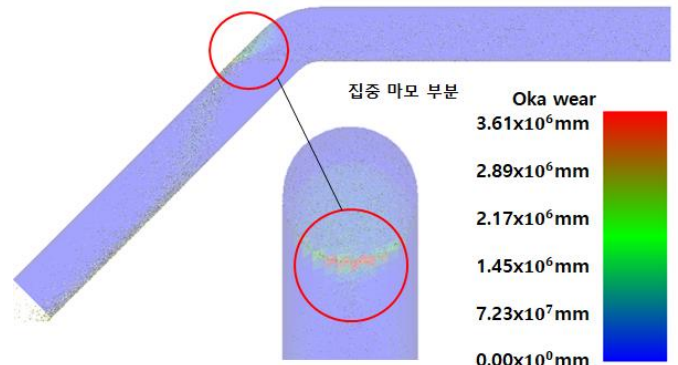


그림 8. 굽힘 각도 45° DEM 해석

그림 13은 굽힘 각도 별 마모량을 그래프로 정리하였다.

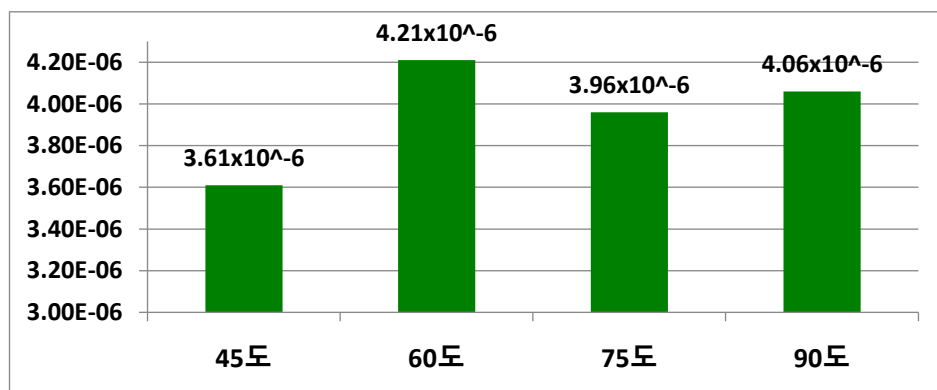


그림 9. 굽힘 각도 별 마모량 변화 그래프 [mm]

분석 결과, 60°의 굽힘 각도에서 입자-벽 충돌이 집중적으로 발생하여 마모가 상대적으로 크게 나타났고, 45도로 갈수록 가파르게 마모량이 감소함을 보인다. 이는 유체 흐름이 곡률 변화에 따라 급격히 변형되며 입자의 운동 방향과 속도에 영향을 주기 때문이며, 이러한 조건은 구조적 손상을 유발할 가능성이 크다. 따라서 마모가 가장 심하게 발생하는 60°는 산업 설계 시 가급적 피해야 할 곡률 조건으로 고려되어야 한다. [6번]

### 3.2 기존 마모 저감 구조와 제안 구조 간의 마모 특성 비교

본 연구에서는 산업 현장에서 가장 널리 사용되는 90° 굽힘 배관을 기준으로, 각 마모 저감 구조의 성능을 비교하였다. 이때 꼬임비율은 6으로 설정하였으며, 이에 따른 피치 길이는 64 mm로 적용하였다.

그림 14는 트위스티드 테이프 구조 배관이고, 그림 15는 새롭게 제안한 강선 구조 배관이다.

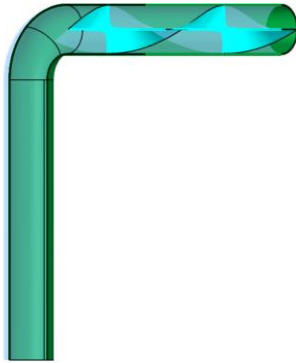


그림 10. 기존 트위스티드 테이프 구조

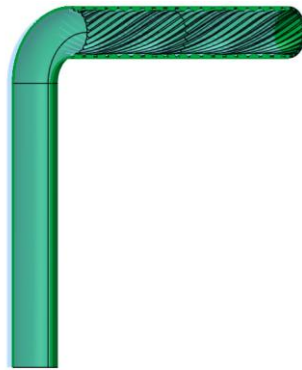


그림 11 새롭게 제안한 강선 구조

그림16, 17은 굽힘 각도 90°에서의 CFD 해석 그림이다.

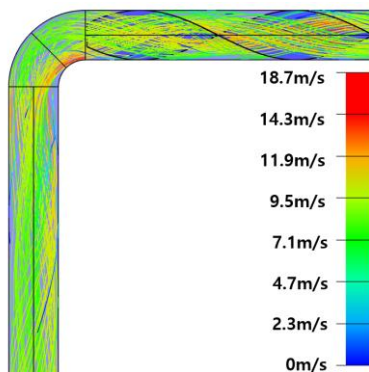


그림 12. 트위스티드 테이프 구조 속도 CFD 해석

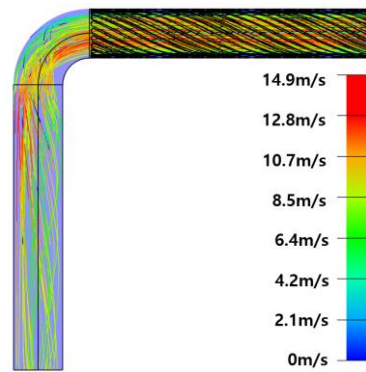


그림 13. 새롭게 제안한 강선 구조 속도 CFD 해석

그림 18, 19는 굽힘 각도 90°와 꼬임비율 6을 기준으로 트위스티드 테이프 구조와 강선 구조의 CFD-EDM 연성 해석 결과를 나타낸다.

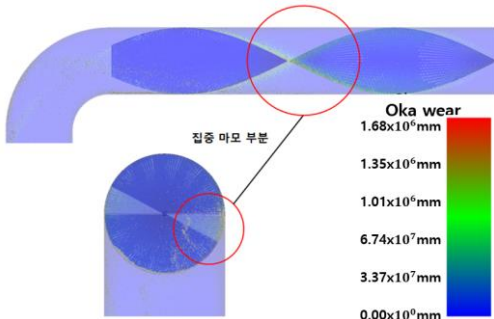


그림 14. 꼬임 비율 6의 트위스티드 테이프 구조의 마모 위치 및 마모량 DEM 해석 결과

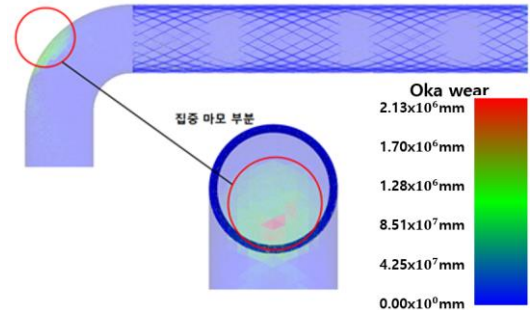


그림 15. 꼬임 비율 6의 새롭게 제안한 구조의 마모 위치 및 마모량 DEM 해석 결과

다음 그림은 일반 배관과 트위스티드 테이프 구조 배관, 강선 구조 배관 별 마모량을 그래프로 정리하였다.

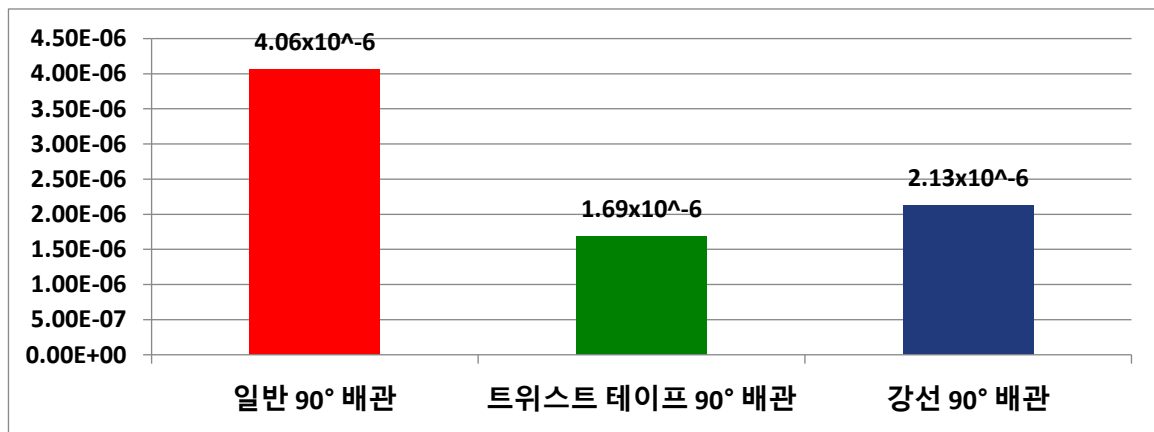


그림 16. 일반 배관과 트위스티드 테이프 배관, 강선 배관 별 마모량 변화 그래프 [mm]

해석 결과, 트위스티드 테이프 구조는 굽힘부 마모 저감에는 효과적이었으나, 구조물 자체의 마모로 인해 유동 교란과 2차 마모가 발생하는 한계를 보였다. 굽힘부는 보강되지만, 비보강 부위는 취약해 유동 변화가 추가 마모와 유지비용 증가로 연결될 수 있다. 반면, 제안한 강선 구조는 삽입물이 없어 마모가 발생하지 않고 유동도 안정적으로 유지되어 국부 마모가 적게 나타났으며, 본 연구에서는 이를 '강선 구조'로 정의한다.

### 3.3 제안 구조의 꼬임비율 변화에 따른 마모량 비교

선행 해석 결과를 통해 기존 트위스티드 테이프 구조의 한계점을 확인하였으며, 새롭게 제안한 강선 구조가 더 우수한 마모 저감 성능을 가진다는 것을 확인하였다. 본 연구는 강선 구조의 꼬임비율별 마모 성능을 비교하고 최적 조건을 도출하였다.

그림 21~26은 굽힘 각도 90°를 기준으로 꼬임비율 별 CFD 해석 결과를 나타낸다.

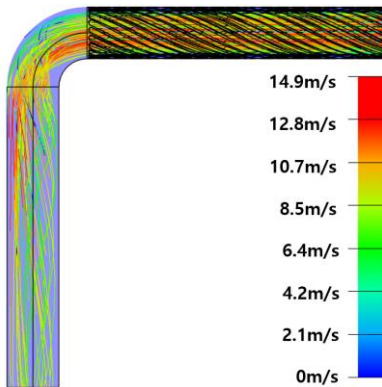


그림 17. 90° 강선 구조 CFD 해석: 꼬임비율 6

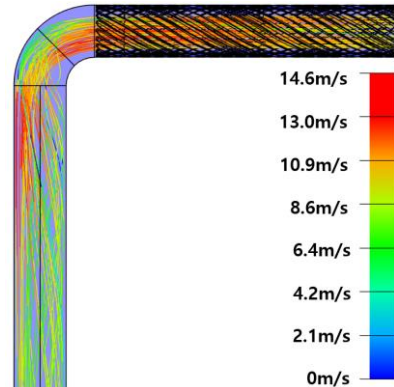


그림 18. 90° 강선구조 CFD 해석: 꼬임비율 5

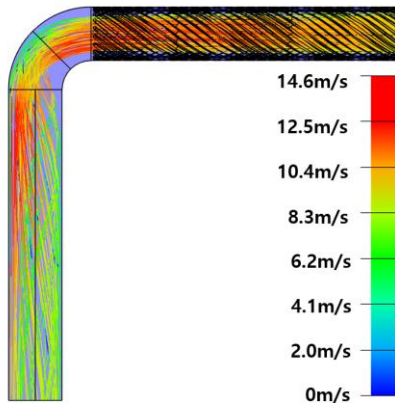


그림 19. 90° 강선 구조 CFD 해석: 꼬임비율 4

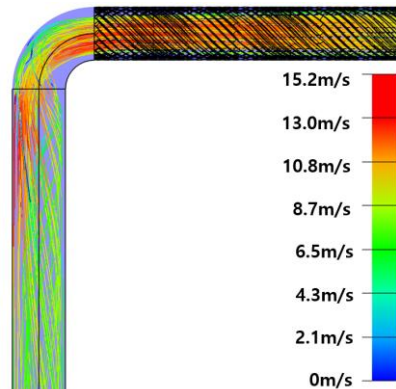


그림 20. 90° 강선 구조 CFD 해석: 꼬임비율 3



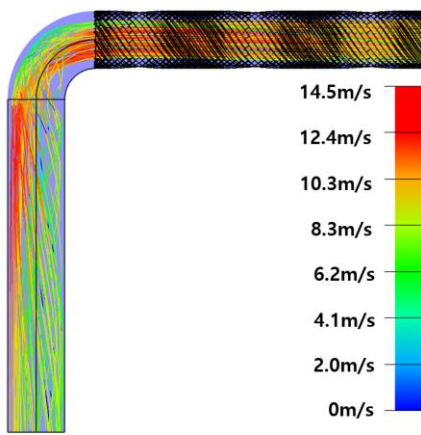


그림 21. 90° 강선 구조 CFD 해석: 꼬임비율 2

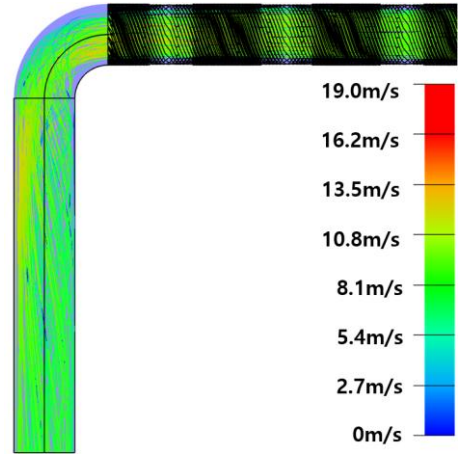


그림 22. 90° 강선 구조 CFD 해석: 꼬임비율 1

그림 27~32는 굽힘 각도 90°를 기준으로 꼬임비율 별 CFD-EDM 연성 해석 결과를 나타낸다.

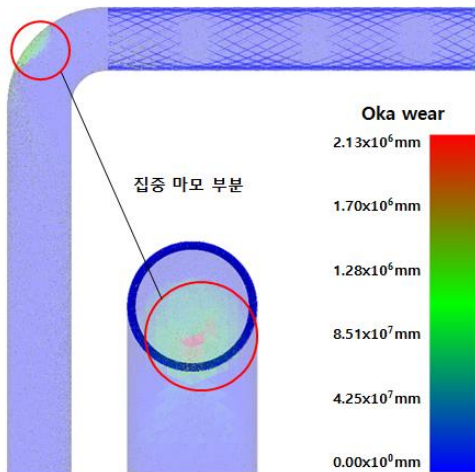


그림 23. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 6

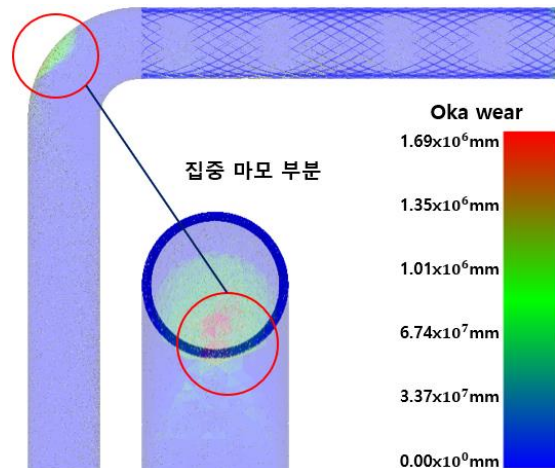


그림 24. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 5

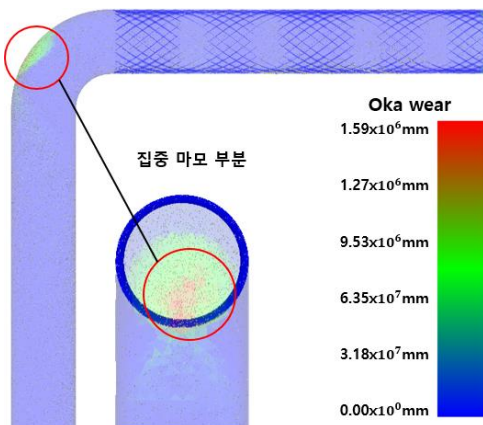


그림 25. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 4

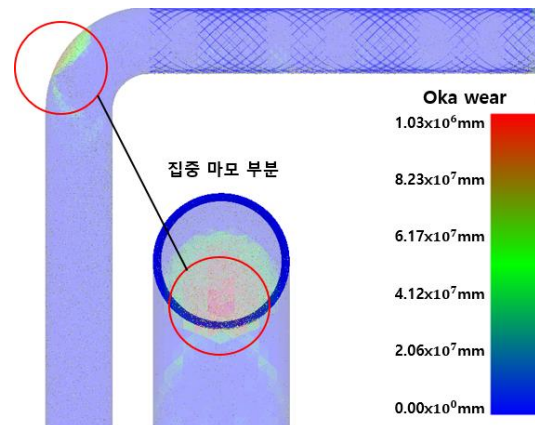


그림 26. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 3

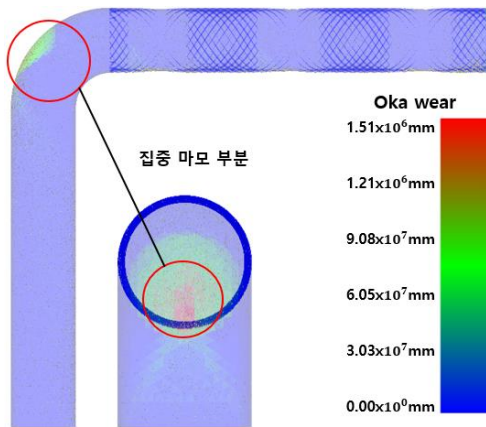


그림 27. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 2

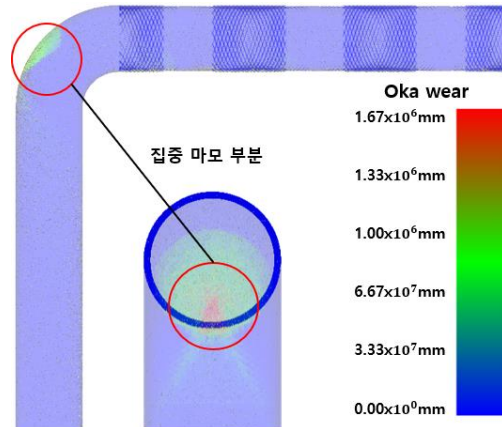


그림 28. 90° 강선 구조 DEM 해석: 꼬임비율 1

해석 결과, 꼬임비율이 6일 때 마모량이 가장 높았으며, 비율이 감소함에 따라 마모량도 점차 감소하여 꼬임비율 3에서 최소값을 나타냈다. 그러나 이후 비율이 2와 1로 감소하면서 다시 마모량이 급격히 증가하는 양상을 보여, 따라서 마모 저감을 위해서는 꼬임비율을 3에 가깝게 설정하는 것이 가장 효과적이며, 적절한 꼬임비율 설계가 중요함을 시사한다.

그림 33은 굽힘 각도 90° 기준 꼬임 비율별 마모량을 그래프로 정리했다.

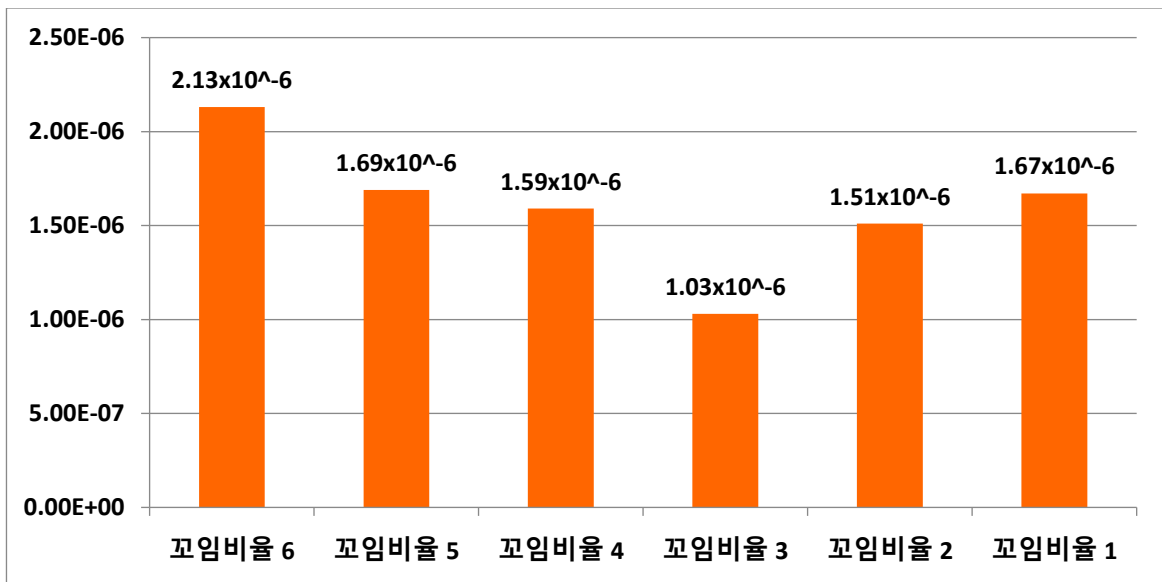


그림 29. 꼬임비율 별 마모량 변화 그래프 [mm]



### 3.4 실험 결과 요약

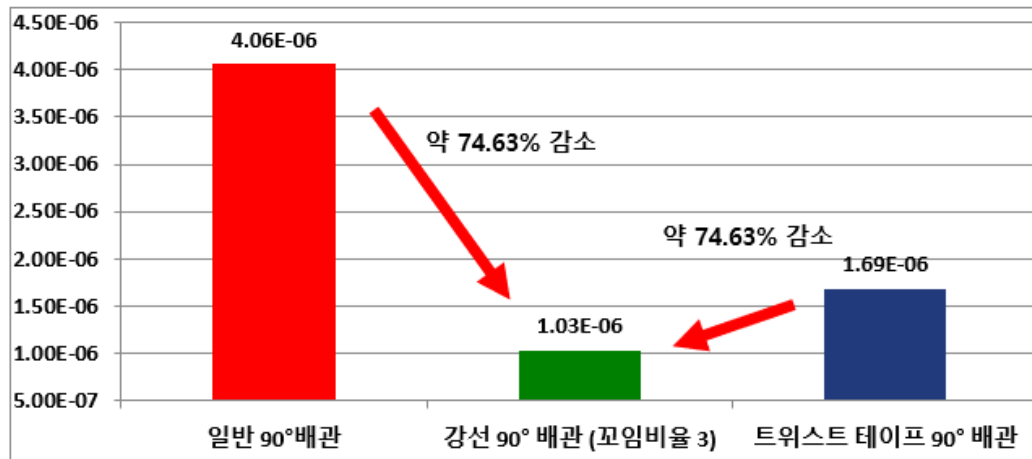


그림 30. 강선 배관과 트위스티드 테이프 배관, 일반 배관 비교 그래프

그림 35는 다른 배관 비교 가장 뛰어난 성능을 보임 강선 구조의 입자 궤적 및 유속을 나타낸다.

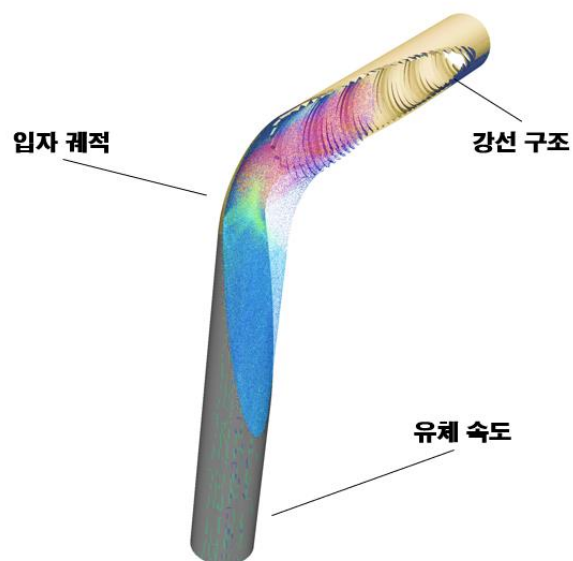


그림 31. 마모 저감 효과가 가장 좋은 꼬임비율 3 강선 구조

앞선 시뮬레이션 결과를 종합하면, 제안한 강선 구조는 경제성과 구조적 안정성 측면에서 모두 우수한 성능을 보였다. 특히 꼬임 비율 3의 강선 구조는 일반 90° 배관 대비 약 74.6%, 트위스티드 테이프 구조 대비 약 39.1%의 마모 저감 효과를 나타내어, 효율적인 마모 저감 대안으로 활용 가능성이 높음을 확인할 수 있었다.

## 결론

본 연구는 굽힘 배관 내 입자 마모 거동을 정량적으로 해석하여, 산업 설계 시 피해야 할 임계각과 새로운 마모 저감 구조의 효과를 검증하는 데 목적이 있다. 시뮬레이션 결과, 굽힘 각도 60°에서 마모량이 가장 크게 발생하였으며, 45°로 각도가 완만해질수록 마모량은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이로 인해 60°는 마모가 집중되는 임계각으로 판단되며, 배관 설계 시 반드시 회피해야 할 곡률 조건으로 제시될 수 있다.

또한, 산업 현장에서 보편적으로 사용되는 90° 굽힘 배관을 기준으로, 기존 트위스티드 테이프 구조와 본 연구에서 제안한 강선 구조를 동일 조건에서 비교하였다. 트위스티드 구조는 굽힘부 마모 억제에는 효과적이었으나, 삽입물 자체의 마모 및 유동 교란으로 인한 2차 마모 가능성이라는 한계를 보였다. 반면, 제안한 구조는 배관 내부에 강선을 파서 만든 형상으로, 삽입물이 없어 구조물 손상이 발생하지 않고, 유동장 안정성과 유지관리 효율이 우수한 것으로 나타났다.

강선 구조의 꼬임비율(TR)을 변수로 분석한 결과, 꼬임비율 3에서 마모량이 최소값을 기록하였고, 이후 꼬임비율 2, 1에서는 마모량이 다시 증가하는 경향을 보였다. 따라서 꼬임비율 3이 마모 저감 성능의 최적 설계 조건임을 정량적으로 도출할 수 있었다.

결과적으로, 제안된 강선 구조는 기존 구조 대비 마모량을 일반 배관 기준 약 74.6%, 트위스티드 구조 기준 약 39.1%까지 저감시켜, 경제성과 구조적 신뢰성 측면에서 모두 우수한 대안임을 입증하였다. 향후에는 실험적 검증을 통해 해석 결과의 신뢰성을 보완하고, 실증 기반의 설계 가이드로 확장할 필요가 있다.

1. H. B. Dukku, J. Arnaut, C. Johnstone, A. Riccardi, and S. O. Sanchez, "Techno-economic feasibility study of hydrogen transportation in Greenland using pipeline and maritime routes," *J. Ocean Eng. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 122–132, Feb. 2025, doi: 10.26748/KSOE.2024.088.
2. A. Dugstad and H. Sirnes, "Experimental study of black powder formation in field TEG solutions," in *Proceedings of NACE CORROSION 2011*, Paper No. 11083, NACE International, Houston, TX, USA, 2011.
3. R. Venkatadri and M. Brayden, "Removal of Black Powder and Other Contaminants in LPG/LNG Furnace Feeds," presented at the 2015 AIChE/EPC Spring National Meeting, Austin, TX, Apr. 26–30, 2015.
4. D. W. Johnson, "Corrosion control: Black powder contamination and mitigation in gas pipelines," *Pipeline & Gas Journal*, vol. 251, no. 8, Aug. 2024. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
5. A. Saleh, M. R. Abdul Kadir, and N. A. Abu Osman, "Effect of fluid–structure interaction in stenotic arteries: A review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 70–71, pp. 1063–1078, Mar. 2016.
6. E. K. Chen, H. Zhou, Y. Wang, D. Wang, Q. Zhang, and Y. Liu, "Erosion wear at the bend of pipe during tailings slurry transportation: Numerical study considering inlet velocity, particle size and bend angle," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 30, no. 8, pp. 1608–1620, Aug. 2023.
7. A. Savekar, D. Jangid, M. Gurjar, V. Patil, and C. M. Sewatkar, "Analysis of Heat Transfer in Pipe with Twisted Tape Inserts," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, Ottawa, ON, Canada, Apr. 30–May 1, 2015, Paper No. 143.
8. Altair Engineering Inc., "The Oka wear model," Altair EDEM Documentation, 2025. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025]
9. Altair Engineering Inc., "Hertz–Mindlin (no slip)," Altair EDEM 2022.2 Documentation, 2022. [Online].
10. V. B. Teffo and N. Naudé, "Determination of the coefficients of restitution, static and rolling friction of Eskom-grade coal for discrete element modelling," *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 113, no. 4, pp. 351–356, Apr. 2013.
11. M. R. Smith and M. A. Dahlin, "A parametric study of erosion in elbows and bends," NASA, Washington, DC, USA, NASA Technical Memorandum 105112, 1993. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
12. U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, "Alaska LNG Pipeline – Special Permit Analysis & Findings for Strain Based Design," *Special Permit Analysis and Findings*, Docket PHMSA-2017-0044, Sep. 9, 2019. [Online].
13. Palabora Mining Company, "Magnetite," [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
14. [E. K. Ejomarie and E. G. Saturday, "Optimal Design of Gas Pipeline Transmission Network," *Global Scientific Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 919–933, May 2020. [Online].
15. Pall Corporation, Removal of Black Powder and Other Contaminants in LPG/LNG Furnace Feeds. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
16. U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, "Pipeline Safety: Safety of Gas Transmission Pipelines," *Federal Register*, vol. 84, no. 102, pp. 26679–26787, May 28, 2019. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
17. Octal Steel, "API 5L X70 Pipe Data Sheet," [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
18. M. R. Smith and M. A. Dahlin, "A parametric study of erosion in elbows and bends," NASA, Washington, DC, USA,

NASA Technical Memorandum 105112, 1993. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].

19. Altair Engineering Inc., "One-Equation Eddy Viscosity Models," AcuSolve Training Manual, 2021. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].
20. K. J. Lee, C. H. Song, and W. J. Lee, "CFD evaluation of erosion damage in a pipe bend due to solid particle transport," Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, Rep. of Korea, Report No. KAERI/TR-2152/2002, 2002. [Online]. [Accessed: 26. Jul. 2025].