

# 다중금속복합층 핵연료 피복관의 필거링 공정에 관한 유한 요소 해석 연구

김태용\*·이정현\*·김지현\*†

## Finite Element Analysis of Pilgering Process of Multi-Metallic Layer Composite Fuel Cladding

Taeyong Kim\*, Jeonghyeon Lee\* and Ji Hyun Kim\*†

(Received 18 December 2017, Revised 22 December 2017, Accepted 27 December 2017)

### ABSTRACT

In severe accident conditions of light water reactors, the loss of coolant may cause problems in integrity of zirconium fuel cladding. Under the condition of the loss of coolant, the zirconium fuel cladding can be exposed to high temperature steam and reacted with them by producing of hydrogen, which is caused by the failure in oxidation resistance of zirconium cladding materials during the loss of coolant accident scenarios. In order to avoid these problems, we develop a multi-metallic layered composite (MMLC) fuel cladding which compromises between the neutronic advantages of zirconium-based alloys and the accident-tolerance of non-zirconium-based metallic materials. Cold pilgering process is a common tube manufacturing process, which is complex material forming operation in highly non-steady state, where the materials undergo a long series of deformation resulting in both diameter and thickness reduction. During the cold pilgering process, MMLC claddings need to reduce the outside diameter and wall thickness. However, multi-layers of the tube are expected to occur different deformation processes because each layer has different mechanical properties. To improve the utilization of the pilgering process, 3-dimensional computational analyses have been made using a finite element modeling technique. We also analyze the dimensional change, strain and stress distribution at MMLC tube by considering the behavior of rolls such as stroke rate and feed rate.

**Key Words :** Pilgering process (필거링 공정), Multi-metallic Layer Composite fuel cladding (다중금속복합층 핵연료 피복관), Accident tolerant fuel (사고 저항성 핵연료), Finite element analysis (유한 요소 해석)

### 기호설명

S.R. = stroke rate

F.R. = feed rate

$\varepsilon_u$  = utilization of productivity of pilgering process

O.D. = outside diameter of tube

I.D. = inner diameter of tube

W.T. = wall thickness of tube

$\sigma$  = engineering stress

$\varepsilon$  = engineering strain

† 책임저자, 울산과학기술원, 기계항공 및 원자력  
kimjh@unist.ac.kr  
TEL: (052)217-2181

\* 울산과학기술원, 기계항공 및 원자력 공학부

## 1. 서 론

경수로의 핵연료 피복관으로는 열 중성자 흡수 단

면이 낮은 지르코늄 합금이 광범위하게 사용되어왔다. 그러나 2011년 후쿠시마 원자력 발전소와 같이 지르코늄 피복관은 냉각재 상실 사고(Loss Of Coolant Accident) 발생 시 고온 증기와 산화 반응이 일어나 다량의 수소를 발생시킨다. 축적된 수소는 수소 폭발을 일으켜 방사성 물질이 대기 중으로 유출되는 심각한 문제를 초래하기 때문에 이 문제를 해결하기 위해 고온의 환경에서도 높은 산화 저항성과 낮은 수소 발생율을 갖는 피복재가 필요하다. 경수로에서 이러한 문제를 피하기 위해, 지르코늄 합금의 중성자 경제성과 사고 저항성을 갖는 다중금속 복합층(Multi-Metallic Layer Composite; MMLC)를 개발하고 있다<sup>(1)</sup>. Fig. 1은 MMLC 피복관의 개략도이다.

MMLC 피복관은 여러 재료의 장점을 살려 특정 기능을 수행하도록 설계되었다. 지르코늄 기반의 합금인 Zircaloy-4 튜브 위에 철 기반 합금으로 보호되었기 때문에 기존 피복관에 비해 지르코늄의 양을 감소시켜 수소 발생을 줄일 수 있다. 또한 직접적으로 고온 증기와 지르코늄이 반응하지 않아 수소화물 형성으로 인한 갑작스러운 취성 파괴에 대한 민감성이 줄어든다. 코팅된 철 기반 합금은 MIT에서 개발된 재료로 고온 산화저항성에 뛰어난 특성을 지녔으며 Fe-12Cr-2Si의 질량 백분율을 가지고 있다. 중간 삽입 층인 Cr, Mo, Ti 금속 층은 지르코늄과 철 합금 사이의 공융상 혹은 화합물의 형성을 피하기 위해 확산 장벽으로 작용하고 있다.

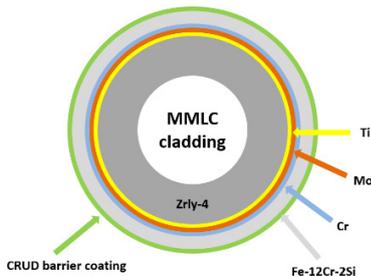


Fig. 1 Description of MMLC cladding cross-section

MMLC 핵연료 피복관 제작 방법으로 Fig. 2와 같이 지르코늄 모관 제작 후 Ti, Cr 그리고 Fe-12Cr-2Si 층을 차례대로 overlay welding 공정을 통해 쌓아 올려 열간 압출 및 필거링 공정을 통해 피복관을 제작하게 된다. 후반 단계인 열간 압출과 필거링 공정은 튜브의 직경과 두께를 줄이기 위한 공정이다. 필거

링 공정은 상온에서 진행되는 냉간 공정으로써 열간 공정에 비해 비용이 적고, 한번에 많은 두께를 일 수 있기 때문에 피복관 생산에서 공정 단계를 줄일 수 있으며 치수 허용 오차가 매우 낮고 표면 조도와 성능을 높일 수 있다<sup>(2)</sup>. 하지만, 상온에서 재료의 강도 및 경도가 높기 때문에 소성 변형 중 재료 내 균열과 파괴를 야기할 수 있다<sup>(3)</sup>. 특히나, MMLC 튜브는 여러 금속 층을 가지기 때문에 서로 다른 소성 변형 거동이 발생하며 overlay welding의 방법으로 인해 층 사이 계면에 존재하는 미세 균열은 층간 박리와 같은 문제를 야기할 수 있다. 따라서 MMLC 피복관의 안정적인 필거링 공정을 진행하기 위해 유한 요소 해석(Finite element analysis) 방법을 이용하여 MMLC 튜브의 필거링 공정 동안 일어나는 응력 변화의 기계적 평가가 필요하다. 이를 위해 본 연구는 몇가지 필거링 공정 변수를 시험하여 공정 최적화를 다루고 있다.

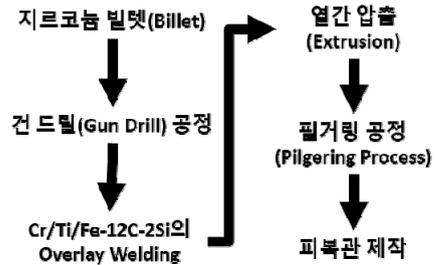


Fig. 2 Manufacturing process of MMLC cladding

## 2. 필거링 공정 해석 접근법

### 2.1 필거링 공정 문헌 조사

필거링 공정은 생산율을 높이기 위해 공정 속도를 높이거나 불량률을 낮추기 위해 장비의 치수, 공정 스케줄 등 여러 공정 변수가 고려되어야 한다. 또한 공정이 진행되는 동안 튜브는 비주기적으로 복합적인 압력을 받게 되어 공정 해석에 어려움이 많다. 따라서 MMLC 튜브의 필거링 공정 해석을 진행하기에 앞서 기존에 진행되었던 필거링 공정 연구를 통해 필거링 공정과 관련된 변수에 대해 문헌 조사를 준비하였다.

#### 2.1.1 필거링 공정 장비

필거링 공정의 주요 목적은 큰 치수의 튜브에 대

해 직경과 두께를 줄이고자 하는 것이다. 튜브의 치수에 따라 필거링 공정의 장비 크기 또한 달라지나 구성되는 장비는 동일하다. 필거링 공정에 있어 주요 장비는 튜브의 외경을 결정하는 한 쌍의 다이(Die)와 내경을 결정하는 맨드릴(Mandrel)로 이루어져 있다. Fig. 3은 필거링 장비의 배치를 보여준다. 다이는 Fig. 4처럼 튜브를 눌러주는 홈이 있고 움직임을 통제하는 피니언 기어와 연결되어 있다. 다이의 홈(Groove)은 다이의 종류에 따라 모양이 다르며 튜브의 두께를 일정하게 줄여주는 선형의 기울기를 가지는 것과 지수함수적으로 두께를 줄이는 홈이 있다. 본 연구에서는 Vertical Mass Ring(VMR) 종류의 필거링 장비를 사용하며 지수함수적으로 두께를 줄이는 홈을 가지고 있다<sup>(4)</sup>.

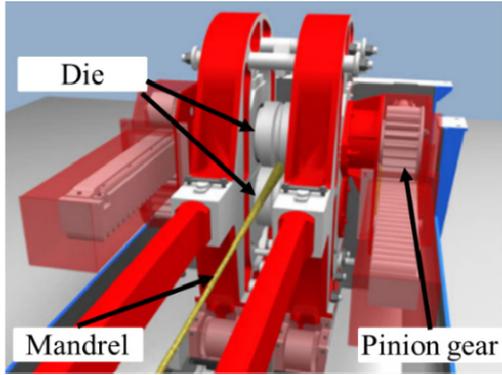


Fig. 3 Schematic of pilgering machine<sup>(5)</sup>

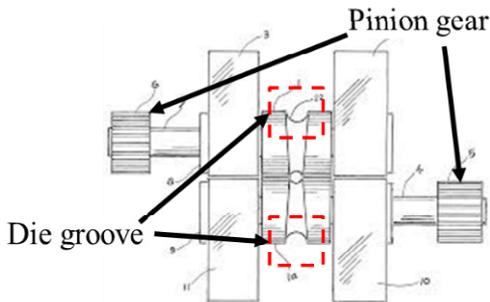


Fig. 4 Detail view of die<sup>(6)</sup>

또한 Fig. 5를 통해 다이 홈의 단면은 원형이 아니라 타원의 형태를 가지고 있다. 이는 다이가 튜브를 누르면서 홈의 양쪽이 튜브를 집는 것을 방지하고 힘의 분산을 위해 Side relief라는 공간을 확보한 것이다<sup>(2)</sup>. 다이 홈의 중심은 튜브를 직접적으로 눌러

튜브의 외경을 줄이도록 하면서 튜브는 side relief의 공간만큼 벌어지지만 튜브가 필거링 장비에 삽입되면서 회전하기 때문에 최종적으로 생산되는 튜브는 원형의 형태를 가지게 된다. 본 연구에서 맨드릴은 지수함수적으로 튜브의 내경을 점차적으로 줄이는 VMR 종류를 사용한다<sup>(4)</sup>. Fig. 6으로부터 맨드릴은 두 부분으로 나눌 수 있다. 튜브의 대부분의 소성 변형이 일어나는 구간은 튜브가 삽입된 직후의 구간인 working section으로 큰 기울기 변화를 가졌다. 맨드릴의 끝단은 sizing section으로 side relief에 의해 만들어진 튜브를 타원형을 원형으로 모양을 잡는 부분이다. 그 외 필거링 공정에서 튜브의 오차를 줄이기 위해서는 다이와 맨드릴의 변형이 일어나지 않아야 하기 때문에 SKB61과 같은 고강도강을 사용한다.

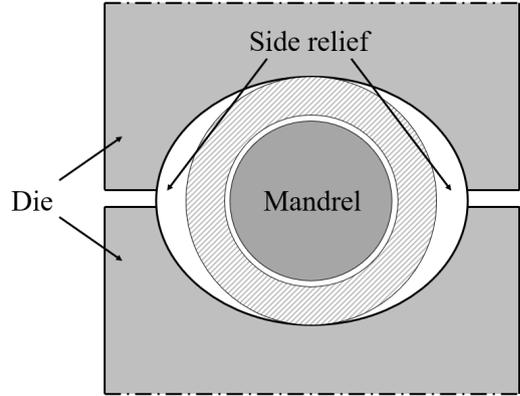


Fig. 5 Cross-section of dies

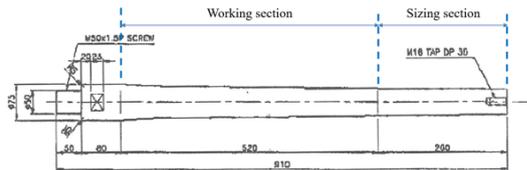


Fig. 6 Schematic of mandrel

### 2.1.2 필거링 공정 변수

필거링 공정 변수는 2.1.1 항에서 설명한 장비의 형태뿐만 아니라 장비의 거동과 튜브의 삽입 방법, 재료 특성, 열처리 방법 등 많은 변수가 존재한다. 여기에서는 필거링 공정에서 직접적으로 성형에 영향을 주는 몇 개의 변수를 알아보았다. 장비의 형태에 따라 생산되는 튜브의 거동이 달라지게 되고 이를 수치화해 공정 변수로 나타낼 수 있다. Q factor는

필거링 공정에서 가장 중요한 변수 중 하나로써 튜브의 외경의 감소와 두께의 감소의 비율로 나타낸 값이다<sup>(2-4)</sup>. Q factor는 식 (1)로 표현할 수 있다. 이는 튜브 외경과 내경의 변형에 미치는 인자로서 작용한다.

$$Q \text{ factor} = \frac{\ln\left(\frac{OD_{final}}{OD_{initial}}\right)}{\ln\left(\frac{t_{final}}{t_{initial}}\right)} \quad (1)$$

다음은 두께 감소율(Reduction rate)로 식 (2)와 같이 튜브의 단면 넓이의 변화로써 측정된다<sup>(4)</sup>. Reduction rate가 클 경우에 피복관 치수에 도달하기 위해 적은 단계의 필거링 공정이 진행되고 그 외 튜브의 균일화, 미세구조, 조직적 특성, 기계적 특성 향상과 튜브의 표면상태가 좋아진다. 하지만 너무 높을 시 필거링 공정 중 튜브의 파손이 일어날 수 있기 때문에 적절히 조절해야 한다.

$$\text{Reduction rate}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad (2)$$

다음은 장비의 거동과 관련이 있는 변수에 대해 설명을 알아보았다. Stroke rate는 직선 왕복 운동을 진행하는 다이의 왕복 속도로서 시간 당 왕복 횟수를 의미하며 단위는 보통 'stroke #/min'으로 나타낸다. 또한 다이가 왕복 운동하는 동안 다이가 튜브와 접촉하지 않고 있을 때 튜브가 90°로 회전하면서 삽입되고 이 삽입 속도를 feed rate라고 한다. 튜브의 삽입은 다이가 맨드렐의 입구 혹은 끝단에서 진행되며 필거링 장비 종류에 따라 양단에서 모두 삽입되는 종류와 한 쪽에서만 삽입되는 종류가 있다. 본 연구에서는 맨드렐의 끝단에서 튜브가 삽입이 되며 삽입되는 속도는 다이가 한 번 왕복할 동안 삽입되는 길이로 'mm/stroke #'로 나타낼 수 있다. 본 문헌에서는 해당 변수에 대해서는 기존 지르코늄 합금의 필거링 공정에 사용한 것을 적용하였고 stroke rate와 feed rate를 다르게 하는 case study를 진행함으로써 응력(Stress)과 변형률(Strain)에 대한 평가를 진행하였다.

### 3. 필거링 공정의 유한 요소 해석 모델

#### 3.1 필거링 구성 모델

필거링 공정은 매우 큰 변형과 비선형적인 재료

거동을 수반한다. 이러한 금속 재료 거동을 분석하기 위해 ABAQUS 6.19 해석 프로그램을 이용하여 필거링 공정의 모의 해석을 진행하였다. ABAQUS 프로그램은 유한요소 해석과 타 프로그램에 비하여 해석에 필요한 다양한 상수를 적용할 수 있어 정확한 해석이 가능하다. ABAQUS를 이용해 필거링 공정 해석을 진행하기 위해서는 재료의 물성과 필거링 공정 장비에 대한 정보를 적용하였고 해석의 정확도를 높이기 위해 각 파트의 용도 및 특성에 따른 강체 및 요소망 형태 조건을 반영하여 파트의 요소를 생성하였다.

#### 3.1.1 모델 제작

Table 1은 MMLC 피복관에 구성되는 각 재료의 물성 정보이다<sup>(7-11)</sup>. 해석을 위해 재료 밀도는 충돌 및 큰 변형 해석에 영향을 미치는 인자로서 고려되어야 하고 그 외 탄성 계수, 푸아송 비, 각 재료의 진응력이 적용하였다<sup>(12)</sup>. Zircaloy-4는 이방성을 고려여 계산을 진행하였다. 항복 강도와 최대 인장 강도는 해석 계산에 직접적으로 다루지 않지만 도출된 해석 결과를 통해 안정적인 소성 거동이 진행되었는지 평가에 적용하였다.

**Table 1** Material properties of MMLC components

재료	FeCrSi	Cr	Ti	Zrly-4
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	7.76	7.19	4.51	6.56
탄성 계수 (GPa)	179	250	105	99.3
푸아송 비	0.33	0.21	0.32	0.37
항복 강도 (MPa)	698	247	300	645
최대 인장 강도 (MPa)	799	419	420	786

필거링 모델은 필거링 장비인 맨드렐과 다이, 그리고 소성 변형이 될 MMLC 튜브로 구성되어 있다. 맨드렐과 다이는 튜브와 직접적인 접촉단이 일어나는 부분만 제작하여 Fig. 7처럼 해석 시 효율성을 높이도록 면으로 구성하였다.

MMLC 튜브는 FeCrSi, Cr, Ti, Zircaloy-4로 50 mm의 직경과 3.7 mm의 두께를 시작으로 최종적으로 12.7 mm의 직경과 570 μm의 두께를 가지는 것을 목

표로 하고있다. 하지만 이번 해석에서 MMLC 튜브는 FeCrSi, Cr, Zircaloy-4로 총 3층으로 구성하여 해석을 진행하였다. 중간 삽입 층인 Cr, Mo, Ti 층의 두께가 다른 층에 비해 매우 작아 계산된 결과에 문제를 야기하기 때문이다. 따라서 중간 삽입층에 대해 취성이 높은 Cr 층으로 대체하여 보수적인 해석 모델을 제작하였고 Fig. 8과 같이 FeCrSi : Cr : Zircaloy-4의 두께가 100 : 100 : 370의 비율인 0.65 mm, 0.65 mm, 2.4 mm의 두께를 적용하였다. 이번에 진행할 필거링 공정에 대해 직경 및 두께 변화, 2.1.2항에서 조사한 공정 변수를 Table 2에 나타냈다. 해당 공정은 VMR50의 장비를 사용하였다.

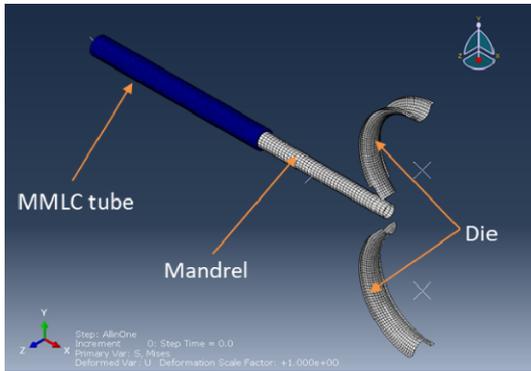


Fig. 7 FEA model for pilgering process

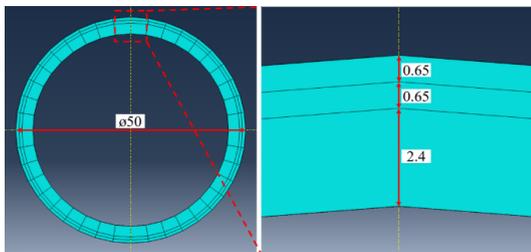


Fig. 8 MMLC tube model for pilgering process

Table 2 Dimensional change, process variable of the pilgering process schedule

	O.D.	W.T.	Reduction	Q value
Initial	50 mm	3.7 mm	58 %	2.4
Target	38 mm	2 mm		

모델 설계 이후 해석 진행을 위해 파트 혹은 파트 간에 특성 정의가 필요하다. 필거링 공정은 비선형 동적 문제로서 ABAQUS에서는 외연적 계산(Explicit solver)을 이용하여 동적 평형에 대한 해석을 진행해

야 한다. 외연적 동역학 과정은 고속 충돌 해석을 가능하게 해주며 관성력의 영향이 주요한 곳에서 적합한 해석이기 때문이다. 파트 특성으로 맨드렐과 다이의 경우에는 변형이 없는 것을 가정하여 ‘discrete rigid body’ 조건을 적용하였다. MMLC 튜브는 외연적 계산 방법을 적용하였고 생성된 유한 요소의 왜곡을 줄이고 더 나은 결과를 도출하기 위하여 규칙적인 배열을 가진 structured 육면체 요소 망을 생성하였다. 요소의 크기는 다이 홈의 곡률과 해석 경제성을 고려하여 3.7 mm 크기를 적용하였다. 다이/맨드렐과 튜브와 접촉 조건은 외연적 조건으로 ‘Surface-to-Surface’ 접촉 조건을 적용하여 일반적인 면 사이의 접촉과 마찰력을 적용하기 위해 사용되었고 ‘Penalty method’를 적용하여 두 면의 접촉에 약간의 관통은 허용하여 계산의 수렴성을 높이고 접촉 해석에 관해 비교적 정확한 계산과 해석 경제성을 늘렸다. 두 면 사이에 작용하는 마찰력은 실제 필거링 공정의 윤활유 종류에 따라 달라지며 0.1을 적용하였다.

### 3.2 필거링 공정 변수 적용

필거링 공정에서 공정 변수로 Q factor 등 장비의 치수에 따라 결정되는 변수 이외에도 필거링 장비 가동 방법, 열처리 등 여러 노하우가 변수로써 작용한다<sup>2)</sup>. 이번 MMLC 필거링 공정은 기존의 50VMR 필거링 장비를 이용하였기 때문에 치수적인 변수는 고정되어 있다. 하지만 그 외에 다이의 거동 및 튜브의 삽입 속도는 공정 운행 중에 작용하는 것으로 치수 및 재료적 변수와는 독립적이다. 따라서 필거링 공정 변수 중 다이의 움직임과 관련이 있는 stroke rate와 튜브 삽입과 관련이 있는 feed rate에 따른 모델 해석을 진행하였다. 본 해석을 바탕으로 추후 치수적인 변수를 변화시켜 최적의 Q factor와 reduction rate를 도출할 예정이다.

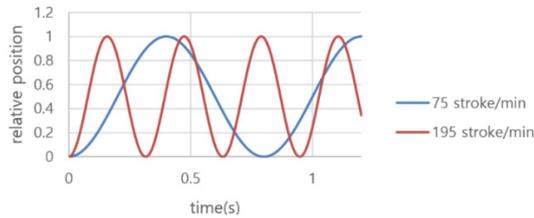
#### 3.2.1 Stroke rate와 Feed rate

MMLC 필거링 공정 해석에서는 Zr 합금의 필거링 공정에서 진행하는 stroke rate와 feed rate를 적용하였다. VMR50을 이용하는 공정에서는 75~195 stroke #/min의 stroke rate와 3~9 mm/ stroke #의 feed rate의 범위에서 공정을 진행한다. 따라서 이번 해석은 Table 3과 같이 최대, 최소의 stroke rate와 feed rate를 적용하여 총 3가지 경우에 대해서 분석을 진행하였다.

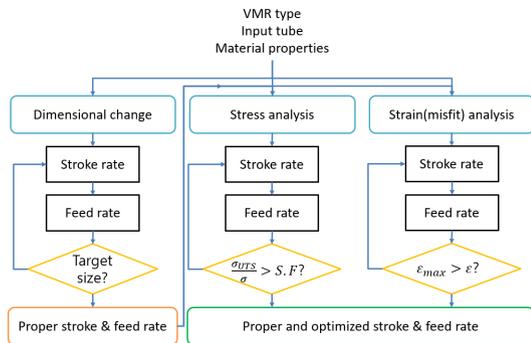
추가적으로 다이의 거동은 피스톤 운동을 통해 진행하기 때문에 Fig. 9와 같이 다이의 왕복운동으로 표현된다. Fig. 9는 최대, 최소 stroke rate의 다이 거동을 표현한 것으로 stroke가 높으면 다이의 왕복 주기가 짧은 것을 확인할 수 있다.

**Table 3** Case list of pilgering process for stroke rate and feed rate

		Stroke rate(stroke#/min)	
		195	75
Feed rate (mm/stroke #)	9	Case1	Case2
	3	Case3	-



**Fig. 9** Behavior of die movements about each stroke rate



**Fig. 10** Evaluation algorithm of pilgering process about stroke rate and feed rate

## 4. 해석 분석

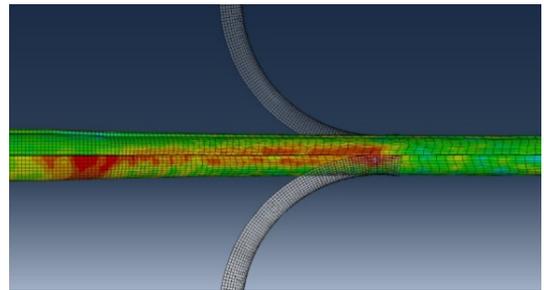
### 4.1 필거링 공정 변수에 따른 튜브 평가

MMLC 필거링 공정변수인 stroke rate와 feed rate를 평가하기 위해 치수, 응력, 층간 박리에 대해 평가를 진행하였다. Fig. 10은 공정변수 평가를 위한 순서도이며 먼저 공정 후 튜브의 치수가 목표 치수와 오차를 줄일 수 있도록 여러 stroke rate와 feed rate를 반복 계산하여 해당 범위를 구할 예정이다. 이후 해당 stroke rate와 feed rate 범위에서 반복 계산을

통해 튜브와 다이가 접촉되면서 발생하는 응력에 대한 평가와 각 층 간의 연신을 차이로 인한 박리 평가로는 변형률을 비교하여 안정성과 생산성을 고려한 stroke rate와 feed rate를 평가하였다.

#### 4.1.1 기하학적 분석

Table 2에서 표기된 것처럼 MMLC 필거링 공정 1 단계로 50 mm 직경을 가진 튜브를 38 mm의 직경으로 줄이는 해석 시뮬레이션을 통해 Fig. 11처럼 튜브가 가공되었다.



**Fig. 11** MMLC tube deformation by pilgering process simulation of VMR50

Fig. 12는 각 층의 외경과 내경(Inner diameter; ID)에 대해서 초기 외경에 비해 case1~3을 통해 변형된 치수를 보여준다. 모든 case에서 각 층이 목표 외경까지 도달하였고 case 마다의 치이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 표 4-4와 같이 각 층의 치수에 대해 모든 case를 고려한 평균을 나타내도 분산된 값이 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 다만 외경 쪽에서 1.1% 정도의 오차가 발생하였지만 다음 단계의 필거링 공정에서 튜브를 삽입할 때 2% 이내의 오차는 용인 가능한 수준이기 때문에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 현재 진행하고 있는 stroke rate와 feed rate로 이후 응력과 변형률 평가를 진행하였다.

**Table 4** Dimension change of MMLC tube and the error after the pilgering process simulation (unit: mm)

	Average	Target	Error
O.D. of FeCrSi	38.42±0.01	38	0.42 (1.1%)
O.D. of Cr	37.65±0.17	-	-
O.D. of Zrly-4	36.96±0.12	-	-
I.D.	34.28±0.03	34	0.28 (0.8%)

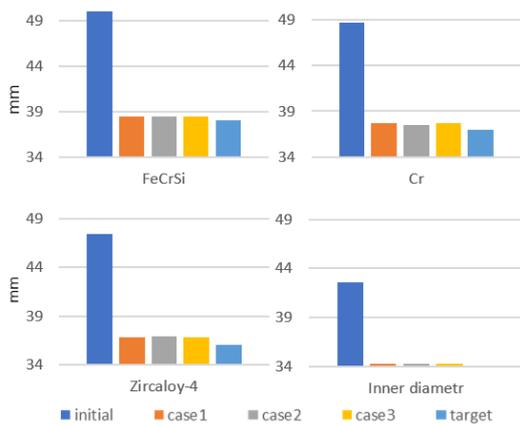


Fig. 12 MMLC tube deformation results of outer diameter of each layer and inner diameter

4.1.2 변형률(Strain) 분석

Fig. 13을 통하여 맨드렐의 working section부터 sizing section까지 튜브의 축방향 변형률을 비교하였다. 본 비교는 필거링 공정이 진행되면서 서로 다르게 길어지는 각 층 사이에 일어날 수 있는 박리를 평가하기 위해 진행하였다. 하지만 모든 case에서 연신율은 약 80 %로 거의 동일한 값을 보인다. FeCrSi 층과 Cr 층은 서로 가깝고 두께가 작기 때문에 서로 비슷한 변형률 값을 가지지만 Zircaloy-4 층은 전체적으로 그 두 층보다 더 높은 변형률 값을 가진다. 그 이유는 다이의 backward rolling 시에 튜브 외곽에서는 Fig. 13에서의 A 지점과 같이 다이와 직접적인 접촉으로 인하여 FeCrSi와 Cr 층이 뒤로 쏠려 x 방향의 변형률이 감소된 반면 Zircaloy-4는 그 영향을 피했기 때문이다. Case1과 case2에서는 튜브 외면과 내면에서의 변형률의 차이가

4.1 %와 4.0 %로 큰 반면 case3은 3.5 %로 보다 작은 차이를 보였다. 이는 feed rate가 커짐에 따라 필거의 한 주기에서 튜브가 받는 두께 감소는 커지기 때문에 이로 인한 튜브와 다이의 마찰력이 증가하기 때문이다. 즉, case1과 2에서 외경은 case1보다 뒤쪽 방향으로 마찰력을 더 많이 받기 때문에 변형률의 차이가 커진 것으로 사료된다. 따라서 층 간의 변형률 차이는 feed rate가 작을수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 반면 case1과 case2의 비교를 통해서 stroke rate는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 그 외에 80 mm 부근에서 음의 방향으로 변형률이 발생하였다. 이는 다이가 backward rolling을 함에 따라 튜브와의 마찰력으로 튜브가 뒤로 수축하였기 때문이다.

4.1.3 응력(Stress) 분석

Fig. 14는 각 층에 대한 튜브의 축방향 응력 분석으로 case에 따른 결과를 나타냈다. 전반적으로 case에 따른 차이는 크게 보이지 않았으나 Cr 층에서 case1이 더 높은 응력 값을 가졌다. Stroke rate가 빠른 case1에서 가속도의 영향을 받아 Cr 층의 응력이 더 높아진 것으로 보인다. 이에 따라 case1에서 Cr 층은 250~350 mm 구간에서 항복 강도인 279 MPa를 넘어서 다이로부터 받은 장력에 의한 약간의 소성 변형이 발생할 수 있다. 0~100 mm 구간에서는 압축 응력이 발생하였다. 이에 대해 설명하기 위해서는 MMLC 피복관의 복합체적 성질을 이해할 필요가 있다. Fig. 15처럼 튜브 외곽에 존재하는 FeCrSi 층은 working section 초반에 인장 응력을 받지만 내부 층인 Cr과 Zircaloy-4는 압축 응력을 받는다.

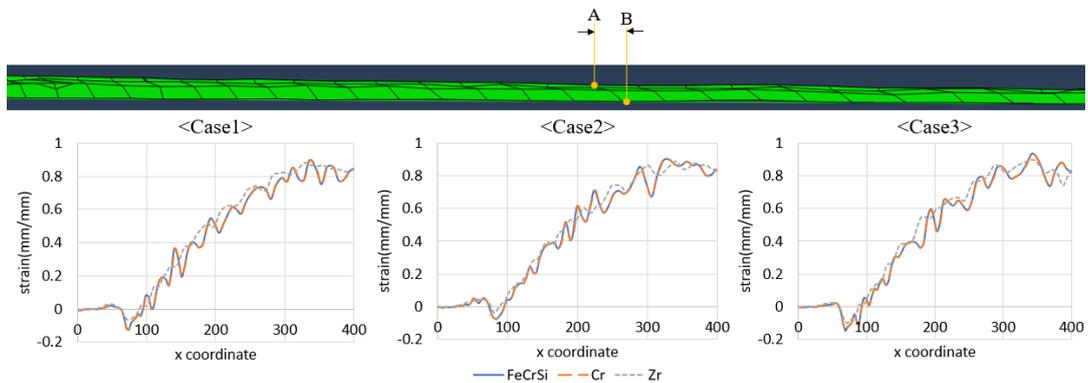


Fig. 13 Cross-section plane perpendicular to circumferential direction of MMLC tube and plots of strain value along x-axis direction about each case study

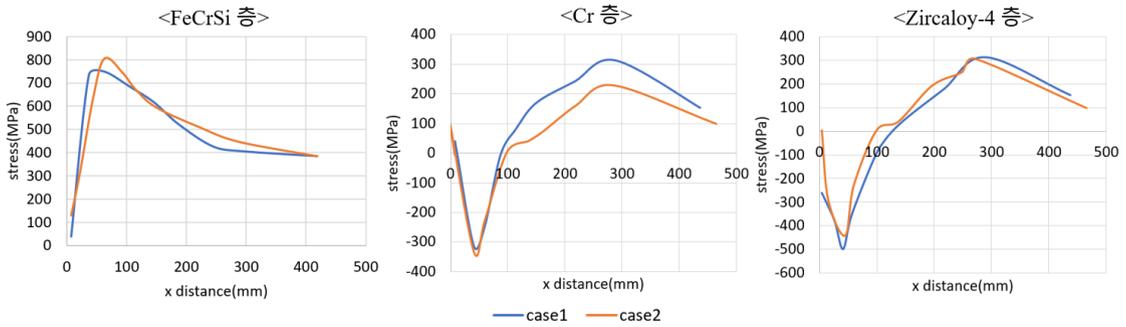


Fig. 14 Stress value along x-axis direction about each layer

Zircaloy-4 층은 Cr 층과 비슷한 응력 분포를 보였으나 case에 따른 차이는 나타나지 않았다. 튜브의 내부에 존재하여 다이의 거동에는 영향이 없으므로 보인다. 뿐만 아니라 Zircaloy-4와 Cr의 최대 인장 강도인 796 MPa과 419 MPa에 대하여 각 층에서 발생하는 최대 응력은 310 MPa 이하의 값을 가지기 때문에 필거링 공정 중 해당 층의 파괴는 발생할 가능성이 낮을 것으로 사료된다. 반면 FeCrSi 층은 working section의 초반에서부터 강한 인장력을 받기 시작했다. 하지만 FeCrSi 층에서 발생하는 응력은 최대 인장 강도인 799 MPa의 근처이다. 문헌 조사를 통해 철 기반 합금 및 지르코늄 기반 합금 튜브의 필거링 공정에서 발생하는 인장 응력은 각 재료의 최대 인장 응력과 거의 유사하거나 약간 큰 값을 가졌다. 그럼에도 불구하고 해당 부분의 파손이 발생하지 않았으며 필거링 공정이 온전히 수행되었다<sup>(13-16)</sup>. 이는 재료가 복합적으로 반복적인 소성 변형을 거치면서 재료의 강도가 증가하였기 때문으로 보인다. 따라서, 초기의 최대 인장 강도를 넘는 응력을 받는다 하더라도

필거링 공정 중에 재료의 파괴가 일어나지 않을 수 있다. 따라서 case2는 800 MPa 이상의 인장 응력을 겪고 있어 공정에 문제를 일으킬 것으로 보이지만 실제 공정 시 문제가 없을 수 있다. 다만, 정확한 분석을 위해서는 각 위치에 맞는 reduction rate를 고려한 재료의 강도 증가와 비교를 통해 응력 분석을 추가적으로 진행해야 되는 것으로 보인다.

현재까지의 stroke rate 변화에 따른 평가로써 FeCrSi 층의 파손을 막기 위해서 항복 응력 보다 낮은 응력 값을 가져 소성 변형을 피하는 것이 이로운 것으로 사료된다. Case2 보다 stroke rate가 120 #/min 높은 case1에서 발생한 인장 응력이 50 MPa을 낮은 값을 가지는 것을 통해 선형 외삽법을 이용하여 stroke rate가 case1에 비해 120 #/min 높은 315 #/min에서 필거링 공정을 진행할 경우 항복 강도 이하의 stress를 가질 수 있을 것으로 보인다. 그 외 250~350 mm 구간과는 다르게 0~100 mm 구간에서는 stroke rate가 높을수록 인장 응력이 낮은 이유는 그림 15와 같이 다이가 튜브를 누르는 것의 반대 방향으로 관성을 받음으로써 튜브를 누르는 힘이 줄어들어 두 면 사이에 작용하는 마찰력이 줄어들었기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 MMLC 피복관 제작을 위한 필거링 공정의 유한 요소 해석을 진행하였다. Stroke rate와 feed rate를 변화시켜 case 연구를 진행한 결과 대부분의 case에서 목표 치수까지 큰 오차없이 변형된 것을 확인할 수 있었다. 박리 평가를 진행하기 위해 각 층마다 축방향으로의 변형률을 평가한 결과 표면에 있을수록 다이의 영향을 받기 때문에 변형률이 내부 층보다 작다. 이때 feed rate가 높을수록 튜브 외경과 다이 사이의

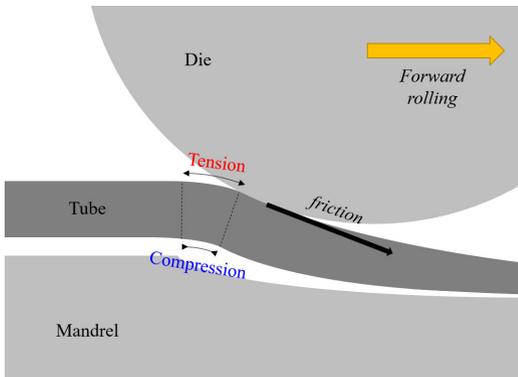


Fig. 15 MMLC tube deformation results of outer diameter of each layer and inner diameter

마찰력이 커지기 때문에 외경과 내경의 변형률이 커지는 것을 확인하였다. 응력 평가에 대해서 응력 값이 최대 인장 응력 값에 가까운 FeCrSi 층에 대하여 튜브 손상을 피하기 위해서는 해당 응력 값을 항복 강도 이하로 낮출 필요가 있다. 해석 결과 MMLC 튜브 필거링 공정 시 315 #/min 이상의 stroke rate를 적용하는 것이 좋으며 feed rate 범위는 현재 지르코늄 튜브 필거링 공정에서는 문제가 없는 것을 확인하였다. 하지만 필거링 공정에 있어서 복합적으로 반복적인 소성 변형을 거치면서 재료의 강도가 증가하였기 때문에 해당 응력에서는 재료의 파괴가 일어나지 않을 가능성이 높다. 정확한 분석을 위해 해당 reduction rate에서의 재료의 기계적 특성을 적용할 필요가 있다.

## 후 기

This work was financially supported by Human Resources Program in Energy Technology (No.2017403 0201430) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), funded by the Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), and by the Korean Nuclear R&D program (No. 2017M2A8A4070142) organized by the National Research Foundation (NRF) in support of the Ministry of Science and ICT (MSIP), Republic of Korea.

## 참고문헌

- (1) Short, M., Zhang, Jinsuo, Whyte, D. Tonks, M., Hanninen, H. and Ehrnsten, U., 2015, "Multilayer Composite Fuel Cladding for LWR Performance Enhancement and Severe Accident Tolerance," Nuclear Energy University Programs, U. S. Department of Energy.
- (2) Hofstetter, S., 1993, "Process improvement through designed experiments," Massachusetts Institute of Technology, pp. 1~120.
- (3) Verlinden, B., Driver, J., Samajdar, I. and Doherty, R., 2007, "Forming Techniques," *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*, Cahn, R. W.(Ed.), Elsevier, pp. 289~297.
- (4) Krishna A. Y V, 2014, "Complexity of pilgering in nuclear application," *J. of Eng. Res. & App.*, Vol. 4, No. 5, pp. 41~46.
- (5) 2011, Institute Tsvetmetobrabotka, <http://cmet.ru/en/products-and-services/equipment>.
- (6) Eddens, F. C., 2009, Roll Die Assembled for Pilger Mills, Patent Application Publication, United States, pp. 1~6.
- (7) Fray, E. S., 2013, "Materials Testing and Development of Functionally Graded Composite Fuel Cladding and Piping for the Lead-Bismuth Cooled Nuclear Reactor," Massachusetts Institute of Technology, pp. 91~112.
- (8) Fuloria, D., Kumar, N., Goel, S., Jayaganthan, R., Jha, S. and Srivastava, D., 2016, "Tensile properties and microstructural evolution of Zircaloy-4 processed through rolling at different temperatures," *Mater. & Design*, Vol. 103, No. 5, pp. 40~51.
- (9) Heieck, J., 1997, "Mechanical Properties of High-Purity Chromium," European Joint Centre, Italy, pp. 1~21.
- (10) Marmy, P., Hegedues, F., Brutsch, R. and Oliver, B., 2004, "Fracture toughness and tensile properties of the titanium alloys Ti6Al4V and Ti5Al2.5Sn before and after proton and neutron irradiations at 150°C," Center for Research in Plasma Physics, Swiss, pp. 1~28.
- (11) Abe, H. and Furugen, M., 2010, "Method of Evaluating Workability in Cold Pilgering of Zirconium Alloy Tube," *The Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 51, No. 7, pp. 1200-1205.
- (12) Mackerle, J. 1996, "Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping—a bibliography," *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 69, pp. 279~339.
- (13) Mulot, S., Hacquin, A., Montmitonnet, P. and Aubin J. L., 1996, "A fully 3D finite element simulation of cold pilgering," *J. of Mater. Proc. Tech.* Vol. 60, pp. 505~512.
- (14) Montmitonnet, P., Loge, R., Hamery, M., Chastel, Y., Doudoux, J. L. and Aubin, J. L., 2002, "3D elastic-plastic finite element simulation of cold pilgering of zircaloy tubes," *J. of Mater. Proc. Tech.*, Vol. 125-126, pp. 814~820.
- (15) Ragger, K. S., Primig, S., Daniel, R., Kaiser, R., Paal, J., Mitterer, C. and Buchmayr, B., 2017, "Cold pilgering of duplex steel tubes: The response of austenite and ferrite to excessive cold deformation up to high strains," *Materials Characterization*, Vol. 128, pp. 257~268.
- (16) Furugen, M. and Hayashi, C., 1984, "Application of the Theory of Plasticity to the Cold Pilgering of Tubes," *J. of Mech. Working Tech.*, Vol. 10, pp. 273~286.