

## 고급강판용 엔드마크 감소를 위한 고무 슬리브의 개발

김순경\*, 김동건\*\*.#

\*동의과학대학교 자동차과, \*\*부산대학교 바이오산업기계공학과

### Development of Rubber Sleeve for Reduction of End-mark in Cold Rolled Steel Sheet

Soon-Kyung Kim\* and Dong-Keon Kim\*\*.#

\*Division of Automotive Engineering, Dong-eui Institute of Technology,

\*\*Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National Univ.

(Received 26 October 2014; received in revised form 23 January 2015; accepted 4 February 2015)

#### ABSTRACT

In this study, a FEM analysis is undertaken of a rubber sleeve which is mounted onto a spreading mandrel so as to avoid marking the first wrappings of coils (known as the 'end-mark'), as occasionally occurs when a concentrated load is placed on the edge of a steel sheet, significantly reducing its quality. A commercial numerical package, ANSYS, was utilized to analyze the structural behavior of the rubber sleeve. In general, the strain of the sleeve increases as the thickness of the rubber layer (H) covering the tubes increases, thus also increasing the surface of the sleeve for a constant boundary condition, and decreasing the pitch (P) between each tube, resulting in an increase in the strain on the surface of the sleeve for all rubber thickness conditions tested here. In a comparison of two different materials, rubber and urethane, when H=3 mm and P=1.1D, the maximum total deformations in these cases are 0.12669 mm and 0.086623 mm, respectively.

**Key Words** : Cold Rolled Steel Sheet(냉연강판), Strip Coiling(권취공정), End-mark(단 마크), FEM(유한요소 해석), Tension Reel(권취기), Rubber Sleeve(고무 슬리브)

#### 1. 서 론

일반적으로 냉연강판은 열연강판을 산으로 세척한 후, 상온에서 콜드 스트립밀(Cold strip mill) 또는 리버스 밀(Reverse mill)로 압연하여 두께가 고르고 표면이 매끈하게 만든 강판이다. 이것을 조절 압연기로 경도를 조정하고 표면을 평활하여 드로잉(Drawing) 등 가공에 견딜 수 있게 한다. 냉연강판은 표면이 아름답고, 프레스 가공에 견디며,

긴 상태에서 가공이 가능하기 때문에 용도가 광범위하여 자동차의 차체, 차량, 계측기, 전기 제품 등 내구 소비재로 사용되기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[1~5]</sup>. 일반적으로 폭에 비해 상대적으로 길이가 긴 냉연강판은 제철소에서 코일의 형태로 권취되어 소비자에게 제공되며, 이런 냉연강판은 권취기의 맨드릴에서 코일 형태로 권취되는데, 진입하는 압연강판의 선단부는 맨드릴의 둘레를 감싸도록 유도 가이드에 의해 안내되고, 맨드릴의 둘레를 감싸는 압연강판의 선단부는 맨드릴의 회전에 의해 압연코일로 권취된다. 이때, 맨드릴은 압연기의 압연코일 내부에 위치한 압연

# Corresponding Author : kdkkim@empas.com  
Tel: +82-51-860-3264, Fax: +82-51-860-3325

강판의 선단이 외부로 돌출되면서 풀리는 것을 방지하기 위해 압연기의 압연속도보다 약간 빠르게 회전한다. 그 결과 긴장력(Tension)을 받으면서 권취된 압연코일은 그 긴장력이 압연 코일의 중심으로 가해지는 가압력이 작용하고, 이런 가압력에 대한 반발력으로 압연강판의 선단에서 생성되는 반발력과 선단의 전방에 위치한 단차공간부에서 생성된 반발력은 큰 차이를 갖는다. 이런 반발력의 급격한 차이에 의해 단차공간부의 상부에 적층된 압연강판에는 소성변형이 발생하게 되며, 이 소성변형은 강판의 두께가 두꺼울수록 권취된 압연코일의 상부층으로 전이되어 선단으로부터 중간부까지 일정하게 Fig. 1과 같이 엔드마크(End-mark)가 발생하게 된다. 이렇게 발생한 엔드마크는 냉연강판에 아연을 도금한 아연도금강판이나, 도장강판의 경우에는 압연강판의 소성변형뿐 아니라, 도금층 또는 도장층의 도금/도장 두께의 변화 및 박리를 유발하여 제품의 등급을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다.

냉연강판의 엔드마크를 저감시키고자 여러 가지 시도 및 개발이 이어져 왔으며, 그중에서 권취 맨드릴에 썬어져 냉연강판과 직접적으로 접촉하는 슬리브를 개선 및 개발하는 시도가 대표적이나 엔드마크로 인한 불량률은 여전히 상당한 실정이다. 기존의 슬리브 기술은 압연강판과 맨드릴과의 마찰력을 증가시켜 강판의 슬립을 방지하는 것이 주목적이나, 본 연구의 대상인 슬리브는 압연강판의 슬립을 방지할 뿐만 아니라 슬리브 내부에 공기 튜브를 삽입하여 강판 선단의 단차 공간을 최소화하여 엔드마크를 줄이는 기술이 접목되어 있다.

본 연구에서는 슬리브 내부에 삽입된 튜브의 설치 방법 및 슬리브를 구성하는 각 층의 구조에 대한 연구를 수행하여 엔드마크를 저감하는 슬리브 개발을 하고자 한다.

## 2. 고무 슬리브의 설계 및 해석

### 2.1 단차 보상을 위한 고무슬리브의 구조

기존 슬리브에서 발생하는 엔드마크를 감소시키기 위해 본 연구에서 개발되는 슬리브는 Fig. 2

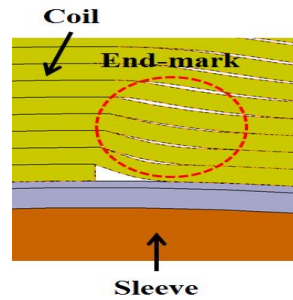


Fig. 1 Definition of end-mark

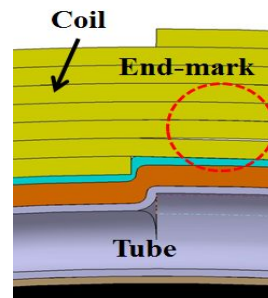


Fig. 2 Step compensation technology

와 같이 슬리브 내부에 튜브(Tube)를 삽입하여 강판이 슬리브에 권취시 발생하는 단차가 튜브의 신축성(Elasticity)에 의해 완화되어 엔드마크를 저감할 수 있다. 즉, 강판 권취시 발생하는 가압력이 슬리브를 누르게 되면, 기존 슬리브의 경우 내부에 팍 차 있기 때문에 슬리브의 변형이 발생하지 않지만, 본 연구에서 개발되는 슬리브는 슬리브 내부에 공기 튜브를 삽입하였기 때문에 가압되는 부분에 대해서 변형이 발생되고, 이 변형에 의해 강판의 단차를 보상하는 기술이다.

### 2.2 고무 재료 상수

고무재료는 하중 및 변형이 비선형 관계를 보이는 대 변형 범위에서도 탄성 거동을 보이는 초탄성 특성을 지닌다. 이러한 고무 재료의 특성은 수치적으로 고무 재료의 거동을 나타내는 변형률 에너지 함수(strain energy function,  $W$ )의 계수 값으로 표현할 수 있다. 고무재료의 거동은 고무 성분 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 시험으로부

터 구한 하중-변위 관계를 가장 적절히 표현하는 변형을 에너지 함수를 찾는 일이 중요하다. 고무 변형을 표현하기 위해서는 재료 거동은 탄성이며 등방성이라는 가정 하에 변형을 에너지 함수는 변형을 불변계수(strain invariant)의 함수로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

여기서  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 은 주 연신율이며, 재료가 등방성인 경우는  $I_1, I_2, I_3$ 는 식 (2)로 정의되는 주 연신율에 대한 불변량이다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

한편, 대부분의 고무 재료는 비압축성이며, 체적계수는 전단계수보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않은 경우에는 비압축성의 가정이 타당한 것으로 알려져 있다.

비압축성 재료의 변형 해석에 널리 쓰이는 변형을 에너지 함수는 다음과 같이 연신율 불변량의 함수로 표시되는 식 (3)의 형태인 Mooney-Rivlin의 다항식 형태와 주 연신율의 함수로 표시되는 식 (4)의 Ogden 형태로 나타낼 수 있다.

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (4)$$

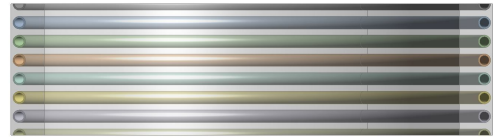
여기서  $C_{ij}, \mu_n, \alpha_n$ 은 시험결과로부터 결정되는 재료 상수이다.

### 2.3 고무 재료 상수의 결정

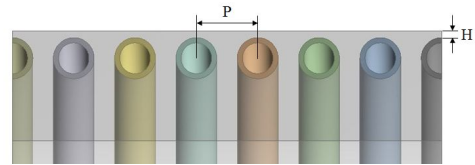
본 슬리브의 고무 변형 해석에서는 연신율 불변량의 함수로 표시되는 Mooney-Rivlin의 다항식을 이용하여 해석을 수행하였고, Mooney-Rivlin의 다항식을 사용하는데 있어서 필요한 상수 값은 Woo 등<sup>[6-7]</sup>이 연구한 논문을 참고하여 적용하였으며 Table 1에 나타내었다.

**Table 1 Material constants of high molecular substances**

Material	Hardness(HD)	C01	C10	Shear modulus(G)
NR	63	0.587	0.0	1.174
NBR	69	0.656	0.0	1.312
CR	66	0.170	0.806	1.952
EPDM	61	0.369	0.130	0.944
CSM	65	0.598	0.317	1.830
Si	68	0.257	0.337	1.188
Urethane	90	3.343	0	6.686



**Fig. 3 Finite element analysis model of the rubber sleeve**



**Fig. 4 Design Parameters**

### 2.4 슬리브의 유한 요소 모델

슬리브의 실제 크기는 외경 464 mm, 내경 420 mm인 중공 형태로 되어 있고, 길이는 1,405 mm이다. 내부에 외경(Do) 12 mm, 내경(Di) 9 mm의 튜브가 삽입되어 있는 구조이다. 해석 수행 시에는 부분적으로 모델을 잘라 해석을 수행하였다. 해석에서 사용된 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 해석 변수로는 튜브의 재질에 따른 변화를 보기 위해 합성고무와 우레탄을 비교하였고, 설계 변수는 Fig. 4와 같이 튜브와 튜브 사이의 간격인 피치(P), 슬리브 내부에 설치된 튜브의 위치(H)를 변화시키면서 해석을 수행하였다.

## 2.5 접촉 및 경계 조건

본 해석은 슬리브와 튜브의 형태로 구성되어 있고, 각각의 모델들은 서로 접촉되어 있다. 이러한 모델들은 힘과 압력이 가해질 때 변형을 일으키는데, 이 때 접촉을 통하여 구조물의 응력 및 변형이 발생하게 된다. 이러한 접촉조건은 접촉면에 Contact와 Target이라는 이름으로 부여되어 힘과 변위를 전달한다. 접촉을 부여하는 알고리즘을 크게 4가지로 분류할 수 있는데, Penalty Method, Augmented Lagrange Method, Lagrange Method, MPC Method로 분류된다.

본 해석에서는 Augmented Lagrange Method를 사용하였으며, Penalty Method는 두 물체가 서로 간에 침투를 허용하는 알고리즘이라면 Lagrange Method는 두 물체 간의 침투를 허용하지 않는다. 즉, 두 물체가 접촉한다는 것은 다른 각도에서 보면 두 물체의 일부가 다른 물체로 침입하지 않는다는 것을 의미한다. 여기서 Lagrange Multiplier Method는 서로 침입하지 않는 조건을 지배방정식에 추가하여 접촉을 처리하는 알고리즘 방식이다. 이것은 Extra Degree of Freedom(Contact pressure)이며 서로 침입하지 않는 조건을 만족시킨다. 이 방식은 지배방정식에 변수를 추가하게 되므로 해석해가 수렴하는데 소요되는 시간이 증가하는 단점이 있으나, 접촉 조건을 세부적으로 정확하게 처리하게 되므로 해의 정확도는 상대적으로 높다.

본 해석의 대상은 반복적으로 동일한 내부 구조를 가진 슬리브의 일부분으로써, 슬리브의 양쪽 옆면에 대한 경계조건은 슬리브의 길이방향으로의 변형이 없다고 가정하였고, 슬리브의 내부 면은 유도 가이드(Belt wrapper)의 면에 접촉하기 때문에 완전 고정 조건을 적용하였다. 슬리브는 19.6 kN의 장력이 작용하는데, 이 힘이 면 전체 작용하기 때문에 압력으로 환산하여 압력조건을 적용하였다. 튜브 내의 압력은 대기압으로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 해석에서는 냉간압연용 슬리브 내부에 공기 튜브를 이용하여 슬리브 표면에 탄성력을 증대시

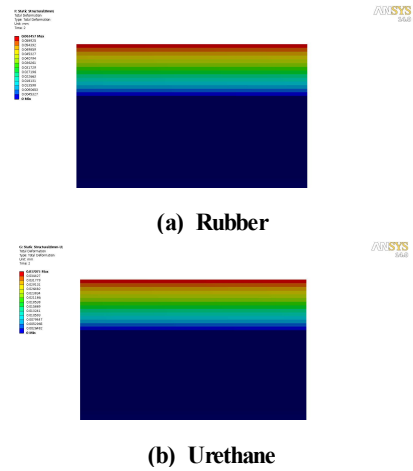


Fig. 5 Distributions of total deformation of sleeve with variation of material

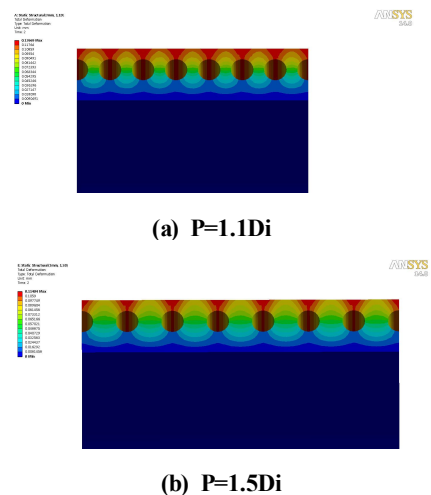


Fig. 6 Distributions of total deformation for variation of tube-to-tube distances at  $H=3\text{mm}$  and rubber sleeve

키는 조건을 알아보기 위하여 슬리브의 재질, 튜브의 설치 간격 및 설치 깊이에 따른 조건을 선택하여 해석을 수행하였다.

먼저 슬리브 내부에 공기 튜브가 없는 경우에 대해 슬리브의 재질 변화에 따라 해석을 수행하여 Fig. 5에 나타내었다. 슬리브의 재질 변화에 따라

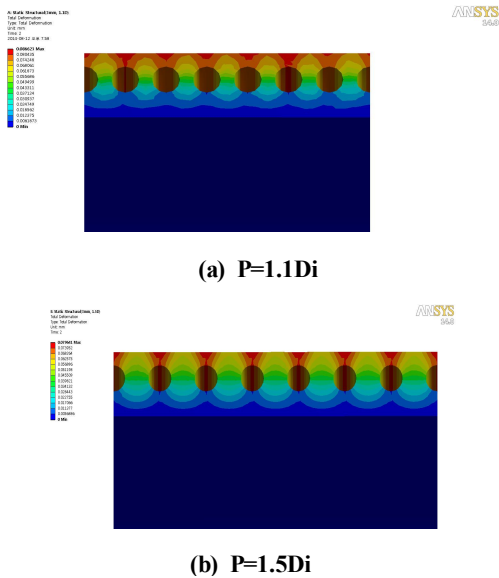


Fig. 7 Distributions of total deformation for variation of tube-to-tube distances at H=3 mm and urethane sleeve

변형 결과를 살펴보면, 최대변형이 나타나는 위치는 슬리브의 표면이고, 변형의 크기는 고무 슬리브의 경우는 0.063457 mm, 우레탄 슬리브의 경우는 0.037075 mm으로 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7은 슬리브 내부에 공기 튜브를 있는 경우에 대해 슬리브의 재질 변화에 따른 해석을 수행하였다. 이 때 내부 공기 튜브의 위치는 슬리브의 표면으로부터 공기 튜브의 외경까지의 거리를 3 mm로 고정한 상태에서 튜브와 튜브사이의 간격을 1.1Di ~ 1.5Di로 변화하면서 해석을 수행하였다. 먼저 Fig. 6에 나타난 고무의 경우를 살펴보면, 튜브와 튜브사이의 간격이 1.1Di는 최대변형이 0.12669 mm이고, 1.5Di는 0.11404 mm인데 이 결과를 토대로 판단해 볼 때 튜브와 튜브사이의 간격이 작을수록 변형이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 7은 우레탄의 경우로, 튜브와 튜브사이의 간격이 1.1Di는 0.086623 mm이고, 1.5Di는 0.079642 mm이다. 우레탄도 고무의 결과와 마찬가지로 튜브와 튜브의 간격이 작을수록 변형이 크게 나타난다.

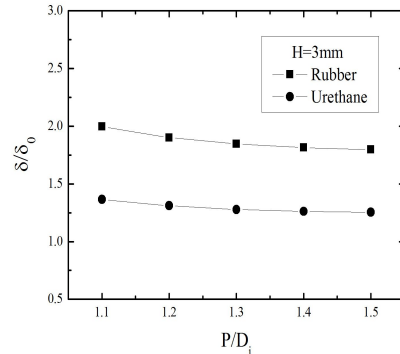
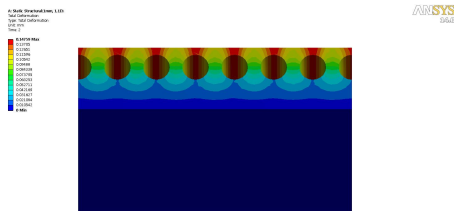


Fig. 8 Comparison of the maximum total deformations for rubber and urethane sleeve

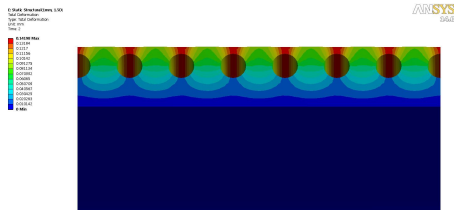
Fig. 8은 고무 슬리브와 우레탄 슬리브에 대해 튜브와 튜브사이의 거리변화에 대한 변형( $\delta$ ) 결과를 슬리브 내부에 튜브가 없을 때의 변형( $\delta_0$ )으로 무차원화하여 서로 비교하였다. 고무의 경우는 튜브와 튜브의 간격이 1.1Di인 경우에서 튜브가 슬리브 내부에 있을 때 슬리브 내부에 튜브가 없을 때에 비해 최대 2배 이상 변형하는 것을 확인하였고, Fig. 6에서 밝혔듯이 튜브사이의 간격이 작을수록 변형량이 커짐을 알 수 있다. 우레탄의 경우는 슬리브 내부에 튜브가 있음으로 인해 1.3 배정도 증가함을 보였다. 이 결과를 판단해 볼 때 변형량을 증가시키기 위해서는 우레탄 재질을 사용하는 것보다는 고무 재질을 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 재질은 고무이며, 슬리브 내부의 위치를 각각 H=1 mm, H=2 mm로 고정한 상태에서 튜브와 튜브 사이의 간격의 변화에 따른 슬리브의 표면에 대한 변형 상태를 나타낸 것이다. Fig. 9는 튜브와 튜브사이의 간격이 1.1Di는 최대변형이 0.14759 mm이고, 1.5Di는 0.14198 mm이며, Fig. 10은 튜브와 튜브사이의 간격이 1.1Di는 최대변형이 0.13294 mm이고, 1.5Di는 0.12317 mm이다. 이는 H=3 mm일 때 나타내었던 Fig. 7의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다.

Fig. 11은 튜브의 슬리브 내부의 위치 변화에 따른 변형 결과를 슬리브 내부에 튜브가 없을 때의 변형으로 무차원화하였다.

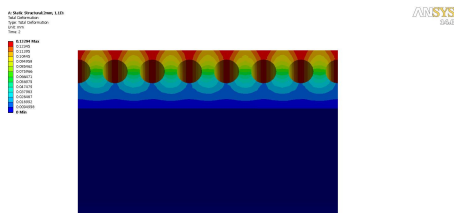


(a)  $P=1.1D_i$

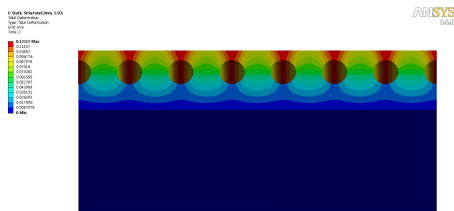


(b)  $P=1.5D_i$

Fig. 9 Distributions of total deformation for variation of tube-to-tube distances at  $H=1$  mm and rubber sleeve



(a)  $P=1.1D_i$



(b)  $P=1.5D_i$

Fig. 10 Distributions of total deformation for variation of tube-to-tube distances at  $H=2$  mm and rubber sleeve

튜브의 위치에 상관없이 모든 경우에 대해서 튜브와 튜브사이의 간격이 좁아짐에 따라 변형이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 튜브의 위치는

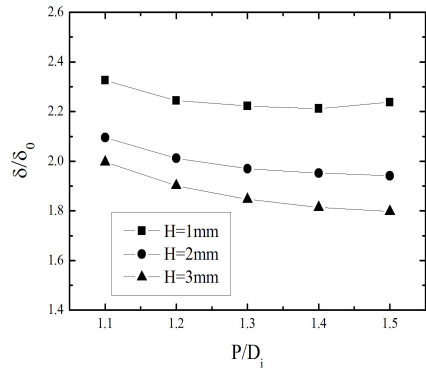


Fig. 11 Distributions of total deformation for variation of tube-to-tube distances at rubber sleeve

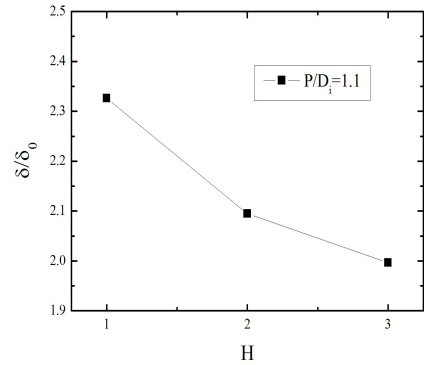


Fig. 12 Distributions of total deformation for variation of position of tube at  $P/D_i=1.1$  and rubber sleeve

슬리브의 표면에 가까울수록 변형량이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 최대 변형은 고무 재질 조건에서  $H=1$  mm이고,  $P=1.1D_i$ 에서 기존의 에어튜브가 존재하지 않는 경우에 비해 2.3배이상 증가함을 보였다.

Fig. 12는 튜브와 튜브사이의 간격이 제일 작은  $P=1.1D_i$ 에서 튜브의 위치변화에 따른 변형을 비교한 것이다.  $H=1$  mm에서 최대변형이 기존의 튜브가 없는 경우에 비해 2.3배이상이고,  $H=3$  mm는 2배로 나타났다. 이는 튜브의 위치가 3 mm에서 1 mm로 이동할 때 변형이 30% 개선되는 것을 의미한다.

## 4. 결론

본 연구는 냉간압연용 슬리브 내부에 튜브를 이용하여 슬리브 표면의 탄성력을 증대시키기 위한 조건을 알아보기 위하여 튜브의 설치 간격 ( $P=1.1\sim 1.5Di$ ) 및 슬리브 표면으로부터 매립된 공기 튜브까지의 깊이 ( $H=1\sim 3$  mm)에 따른 슬리브의 변형량을 관찰하기 위해 유한요소 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 일정한 하중이 슬리브의 표면에 가해질 때, 고무와 우레탄 재질에 대해 변형량을 비교한 결과 기존에 튜브가 없는 경우에 비해 고무는 100%, 우레탄은 35% 탄성이 개선되어 변형이 증대되었기 때문에 단마크 감소를 위한 슬리브의 재질은 고무가 더 적합하다.
2. 튜브와 튜브사이의 간격 변화에 따른 슬리브의 변형은 튜브와 튜브사이의 간격이 작을수록 변형량은 최대 10%이상 증가함을 보였고, 이는 튜브사이의 간격이 작으면 작을수록 변형량이 증가한다.
3. 슬리브 내의 튜브 위치는 슬리브의 표면과 가까운  $H=1$  mm에서 최대변형이 나타났으며, 이는  $H=3$  mm에 비해 30%이상 개선되는 결과이다.
4. 냉간강판의 두께의 경우 최소 0.5 mm에서 2.0 mm에 이르기까지 다양하고, 슬리브의 구성을 위해 슬리브 표면의 강도적인 측면을 고려해 볼 때 추가적인 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

1. Jung, Y. J., Lee, G. T. and Kang, C. G., "Tension/Heat/Thermal Deformation Analysis of a Cold Coiled Strip in Coiling Process," The Korean Society for Technology of Plasticity, Gyeongsan Korea, pp. 39-43, 2002.
2. Koo, J. M., Kim, H. J., Lee, J. K. and Hwang, S. M., "Residual Stress Analysis of Hot Rolled

- Strip in Coiling Process," Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 4, pp. 302-307, 2003.
3. Kwac, L. K. and Kim, H. H., "A Study on the Durability of a Wedge for Transportation of Rolled Steel Plates using FEM," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 3, pp. 328-335, 2009.
4. Park, K. C., and Nam, J. B., "A Study on the Effect of Sheet Properties and Coiling Conditions on the Sheet Shape by Deformation Analysis for Coiling," The Korean Society for Technology of Plasticity, Jeju Korea, pp. 255-258, 2012.
5. Kim, Y. H., Kim, S. K. and Jeon, E. C., "A Study on the Corrosion Mechanism by the Moisture on the Surface Layer of the Alloys Coated Steel Sheet," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology, Vol. 1, No. 1 pp. 71-78, 2002.
6. Woo, C. S. and Park, H. S., "Mechanical Properties Evaluation of Natural and Synthetic Rubber," Elastomer, Vol. 42, No. 1, pp. 32-46, 2007.
7. Woo, C. S., Park, H. S. and Lee, G. A., "Physical Test and Finite Element Analysis of Elastomer for Steel Rack Tube Forming," Elastomer, Vol. 43, No. 3, pp. 173-182, 2008.