

유한요소법을 이용한 권취강판 적재운송용 Wedge의 내구성에 관한 연구

곽이구⁺, 김홍건*

(논문접수일 2009. 3. 24, 심사완료일 2009. 6. 3)

A Study on the Durability of a Wedge for Transportation of Rolled Steel Plates Using FEM

Lee Ku Kwac⁺, Hong Hun Kim*

Abstract

In order to transport the steel roll coil effectively and safely to the destination, the stability of the steel roll coil which induced the minimum movements during the transportation was strongly required. The basic transportation equipment for the steel roll coil such as the wedge is made of 100% imported wood known as the apitong. However, the material characteristic such as the rigidity has caused permanent damages to the steel roll coil and the damaged steel roll coils were not easily restorable. Thus it was unsuitable for other purposes. The introduction of new materials to manufacturing wedges which would have a good recovery performance and thus enable the wedge prevention or reduction to the steel roll coil or any other products during the transportation is needed. Due to the fact that recovering damage of the coil is almost impossible, we have to find the new type of wedge that can substitute the apitong wedge. Therefore, we are going to develop a wedge that does not damage rolled steel coil and has better recovery and softness than existing apitong wedge.

Key Words : Rolled Steel Plates(권취강판), Wedge (받침대), Cord Mixing Rubbe(혼합고무), Composite Material Modeling(복합체 모델링)

1. 서론

보편적으로 제철소에서 생산되는 강재 중 권취강판(捲取

鋼板; Rolled Steel Plates)을 운송하는 방법으로는 육상과 해상을 이용한다. 이때 제품의 손상 없이 신속하고 안전하게 목적지까지 운송하기 위해서는 권취강판 적재시 제품의 움

+ 전주대학교 기계자동차공학과
* 교신저자, 전주대학교 기계자동차공학과 (hkim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 백마길 45

직입이 최소화될 수 있도록 안정화가 필수적이라 볼 수 있다. 현재 권취강판 적재에 삼각 받침목을 이용하여 운송 중 발생하는 움직임을 안정화 하고 있다. 하지만 딱딱한 나무 특성 때문에 제품표면의 손상이 발생되어 수요자의 불만이 고조되어지고 있으며, 버팀성이나 지지성이 우수한 반면에 순간적인 충격에 의해 권취강판 제품 표면을 훼손하거나 손상시키는 문제, 권취강판의 눌림 변형에 따른 회복성능 저하문제 및 파손에 의한 재사용이 불가하여 내구성 저하 등의 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Kwac은 권취강판 적재시 바닥면에서 하중을 지지하는 복합소재 Dunnage에 관하여 유한요소해석과 시제품의 성능평가 등을 수행하여 권취강판의 손상 및 훼손 방지에 효과적인 결과를 도출하였다⁽¹⁻³⁾. 이러한 복합소재 Dunnage의 후속연구로 권취강판의 운송 중 발생하는 움직임을 최소화 할 수 있는 복합소재 삼각 Wedge에 관한 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 권취강판의 적재 및 운송 시 움직임을 안정화 하면서 손상을 최소화 하는(Softness), 고하중에 견딜 수 있는 견고성(Rigidity) 및 우수한 회복성(Recovery)등의 내구성이 기존의 삼각 받침목 보다 뛰어난 복합소재 삼각 Wedge의 형상과 구조에 대하여 유한요소해석법과 시제품의 UTM 시험 등의 방법으로 연구를 수행하였다.

2. Wedge의 구조설계

Wedge의 단면형상은 권취강판의 적재 및 운송시 보다 더 안정성을 향상시키고자 삼각형상을 고려하였으며, Wedge에 권취강판의 적재 상태를 살펴보면 Fig. 1과 같다.

Wedge에 사용재료로서는 폴리에스테르 코드를 합성고무와 혼합한 코드혼합고무층(Fabric Cord Mixing Rubber), 스틸 꼬임코드(Steel Twisted Cord)에 고무토픽(Topping)이 되어 있는 스틸코드층 및 Wedge 표면의 외관 보호용 외피고무층으로 크게 세 가지 재료로 구성되어 있다. 여기에서 Wedge의 견고성을 결정 짓는 폴리에스테르 코드를 합성고

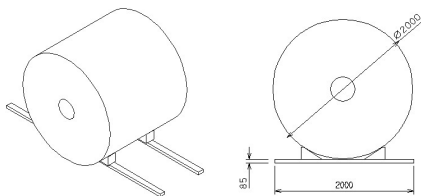


Fig. 1 Loading Condition of Rolled Steel Plates

무와 혼합한 코드혼합고무층을 코어라 칭하며, 이러한 코어부는 Wedge의 굽힘강성 및 뒤뜸강성을 좌우하게 되어 권취강판의 고하중을 지지하게 된다. 또한, 단면형상측면에서 삼각형 형상으로 검토하였으며, 고안된 형상과 구조는 다음 Fig. 2와 같다.

3. 유한요소 해석

유한요소해석 모델은 권취강판을 Wedge와 Dunnage에 적재 및 운송시의 조건을 부여할 수 있도록 권취강판, Wedge, Dunnage 및 지면으로 구분하여 모델링 하였으며, 유한요소해석 모델은 다음 Fig. 3과 같이 나타내었다.

유한요소해석 모델의 경우 보다 더 신뢰성이 높은 결과를 얻기 위하여 3차원 8절점 솔리드 요소를 사용하여 3차원 해석을 실시하였다. 고무의 물성은 승용차용 타이어에 사용되는 폴리에스테르 코드를 파쇄하여 합성고무와 혼합하여 사용함으로써 일반 합성고무보다는 높은 물성을 지니고 있으며, 이러한 혼합고무는 등방성(Isotropic) 물질로 고려하여 적용하였으며, Table 1과 같다 .

또한 스틸코드는 여러 개의 필라멘트(Filament)들이 꼬여

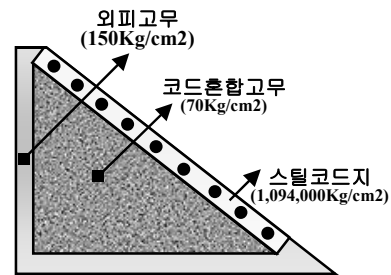


Fig. 2 Structure of Wedge

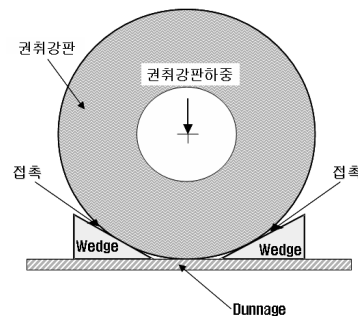


Fig. 3 Finite Element Analysis Model of Wedge

있는 상태에서 고무를 이용하여 토핑한 상태이므로 이를 가류(Vulcanization) 할 경우 코드의 방향과 코드 직각방향 물성 차이가 크게 나타나게 된다. 이러한 특성을 정확히 묘사하여 적용하지 않을 경우 현실과 거리가 먼 결과를 가져다 주기 때문에 특히 주의해야 할 사항이다. 따라서 이러한 복합체 모델링(Composite Material Modeling)에서 정확한 해석을 하기 위해서는 코드와 고무를 각각 요소 분할하여 물성을 별도로 적용하여야 하나 이렇게 할 경우 해석모델의 요소 수가 많아져서 컴퓨터 리소스가 많이 필요하게 되며 수십 시간에서 수일간의 해석시간이 소요되어 여러 가지 경우에 대한 검토가 불가능하다는 단점을 지니게 된다. 따라서 이러한 복합체의 모델을 현실에 근접하도록 묘사한 Halpin-Tsai Equation을 적용하여 각 방향에서의 물성값을 얻어내었다. 복합체의 물성값은 실험치와 근사적인 결과를 가져다 줄 수 있는 Halpin-Tsai Equation⁽⁴⁾은 Fig. 4와 식 (1)~(2)와같이 표현된다. 코드와 고무의 제조사양을 Table 2에 나타내었으며, 코드와 고무복합체의 물성을 Table 3에 나타내었다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_c v_c + E_r (1 - v_c) \\ E_2 &= E_r (1 + 2v_c) / (1 - v_c) \\ E_3 &= E_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} G_{12} &= \frac{\{G_r [G_c + G_r + (G_c - G_r)v_c]\}}{\{G_c + G_r - (G_c - G_r)v_c\}} \\ G_{13} &= G_{12} \\ G_{23} &= \frac{E_2}{\{2(1 + 2\nu_{23})\}} \end{aligned} \quad (2)$$

Wedge의 경우 타이어 제조공정에서 버려지는 스크랩인 코드지와 고무를 이용하여 잘게 파쇄 시킨 후 혼합한다. 파

Table 1 Physical Properties of Rubber(Unit : kg/mm²)

부 품	E	C ₁₀	C ₀₁	비고
코드혼합고무	7.0	1.17	0.29	-
외피고무	3.6	0.6	0.15	-

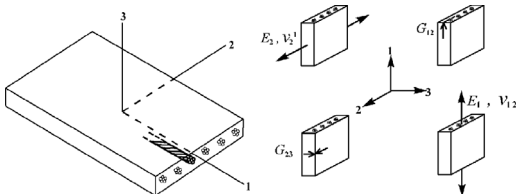


Fig. 4 Tensile and Shear Young's Modulus of Cord and Rubber Composite Material

쇄 코드와 고무가 혼합된 재료를 Wedge의 형상에 일치하도록 성형한 후 황을 첨가하여 고무의 폴리머 사이를 가교(Cross-linking) 시켜 매우 단단한 경화체로 만들어 내는 가류공정을 거쳐서 완제품이 제조된다. 따라서 Wedge는 코드를 잘게 부순 후 고무에 혼입하여 경화시킴으로 복합체의 물성을 유한요소 입력 데이터에 적용하여야 한다. 따라서 여러가지의 복합체 중에 이러한 경우에는 등방성 재질로 고려하여 입력하였다. Wedge 코드층의 경우 타이어 제조공정에서 발생되어 버려지는 스크랩인 코드지를 적정각도로 채단하고 코드지 사이에 고무층을 삽입하여 성형을 한 후 가류공정을 거쳐서 매우 단단한 형태의 경화체를 형성시킨다. 특정 방향을 지닌 코드층과 고무 층이 여러 겹 쌓인 복합체 구조일 경우 여기에서는 정방성(Orthotropic) 재질로 고려하여 물성값을 입력하였으며, 여러층이 존재함으로 각 층들에 대해 요소 생성시 해석모델의 크기가 방대해짐에 따라 Equivalent Modulus 값을 적용하였다⁽⁵⁾.

경계조건으로는 권취강판의 자중을 적용하기 위해서 중심부에 집중하중이 작용하도록 하였으며, 이러한 집중하중은 Fig. 5와 Table 4와 같이 2단 적재 및 운송시를 고려하여 최대 작용하중을 계산하였다.

권취강판은 매우 단단한 물체로 정의 하였으며, 상부 중심에 운행시의 집중하중이 작용하도록 하였다. wedge는 사각 Dunnage 상에 놓여서 권취강판의 하중을 받도록 되어 있으며, 실제 상태를 파악하고자 Dunnage와 동시에 모델링하여 접촉 문제를 적용하였다. 바닥대의 하부는 지면에 접촉되어 움직임이 없도록 하기위해 X, Y 및 Z 방향에 대해 모두 고정 시켰다.

Table 2 The manufacturing specifications of the cord and the rubber

부품	φ _c (mm)	EPI	G/A (mm)	A _c (mm ²)	v _c	v _r
스틸코드	1.2	13	2.0	1.508	0.29	0.71

φ_c: 꼬임코드직경, EPI: 인치당 코드갯수, G/A: 고무토핑두께 A_c: 꼬임코드의 단면적, v_c: 복합체의 총 체적에 대한 꼬임코드가 차지하는 체적, v_r: 복합체의 총 체적에 대한 순수 고무만의 체적

Table 3 Physical Properties of Cord and Rubber Composite Material(Unit : kg/mm²)

부품	E ₁	E ₂ = E ₃	ν ₁₂ = ν ₁₃	ν ₂₃	G ₁₂ = G ₁₃	G ₂₃
스틸코드	3,173	7.9	0.44	0.49	2.17	2

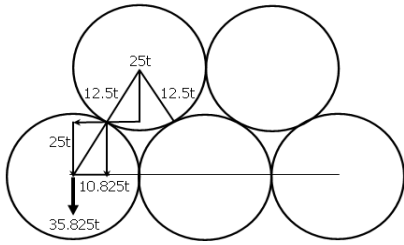


Fig. 5 The Applied Load Distribution per Layer for 2 Layered Rolled Steel Plates

Table 4 Load of Rolled Steel Plates(Unit : ton)

구 분	2단적재	2단운행
권취강판 하중	35.825	71.65

※ 운행시는 적재하중의 2배 적용

실제적인 거동에 근접하도록 최대한 접촉문제로 처리를 하였으며, 구체적인 사항으로는 권취강판과 Dunnage의 접촉부위, Wedge와 Dunnage의 접촉부위, Dunnage와 지면과의 접촉부위를 각각 접촉문제로 지정하여 처리함으로써 보다 더 현실에 근사한 결과를 얻도록 수행하였다. 또한 각각의 접촉부위에서의 마찰계수는 고무와 스틸의 미끄럼성을 고려하여 “0”을 적용하였다. 권취강판이 Dunnage 위에 놓여 움직임이 없도록 빼기역할을 하고 있는 Wedge와는 상호 접촉이 되도록 하였으며, 이때 마찰계수는 0.7을 적용하였다. 권취강판이 사각 Dunnage 위에 놓여 접촉하면서 철 코일의 자중이 사각 Dunnage에 작용하도록 하기 위해서는 상호 접촉이 되어야 하며, 이때 적용된 마찰계수는 0.7을 적용하였다.

Wedge는 권취강판의 자중에 의해 접촉이 되어지고 있으며, 권취강판의 하중이 가해지면서 변형이 발생되고, 이러한 변형은 하부의 사각 Dunnage위에 작용하여 변형을 일으키게 됨으로 상호 접촉을 정의하였으며, 이때의 마찰계수는 1.0을 적용하였다. 유한요소해석기법을 이용하여 해석결과를 통한 집중적인 검토사항으로는 권취강판 적재부위에서 Wedge의 변형상태와 응력에 의한 파손여부 등이다. 권취강판의 적재 운송에 있어서 운행시(적재하중의 2배 적용) 유한요소해석을 통하여 Wedge의 변형상태를 파악하였으며, 아래 Fig. 6과 7은 전체 및 세부 변형상태를 보여주고 있다.

권취강판과 Wedge의 손상을 최소화 하기 위해서는 유연성측면에서 5,000kg/mm이하 이며, 견고성 측면에서 3,000kg/mm 이상을 동시에 만족하는 것이 가장 바람직하다. Table 5의 해석결과와 같이 복합소재 Wedge의 변형율은 약 8%정도

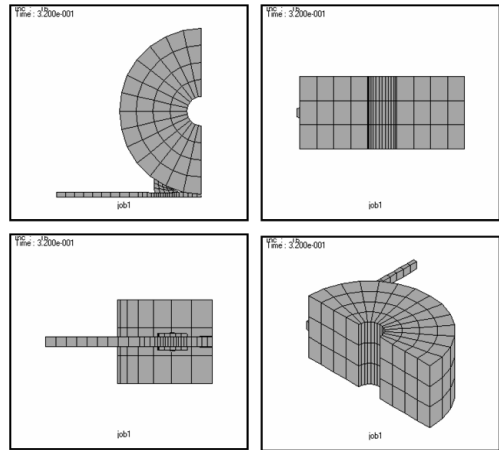


Fig. 6 Deformation State of Total Model

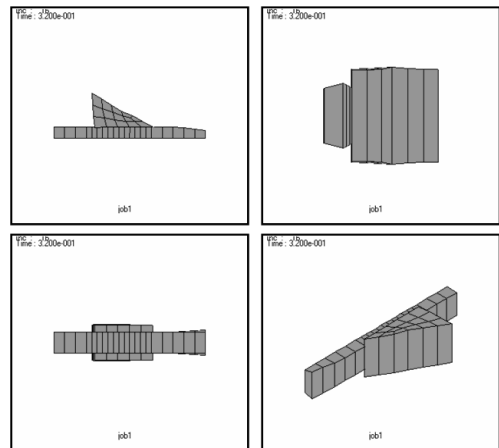


Fig. 7 Deformation State of Wedge Model

Table 5 The Deformation Results of Wedge

구분	변형량 (mm)	변형율 (%)	비고
복합소재 Wedge	10.03	8.02	적재하중의 2배
목재 Wedge	5.01	4.01	적재하중의 2배

로 나타남에 따라 비압축성 재질로 구성된 고무-코드복합체인 것을 고려할 경우 유연성을 지니면서도 권취강판의 적재에 따른 손상 발생 우려가 적다고 할 수 있으며, 반면수입목재 Wedge의 경우 같은 조건에서 5mm의 변형량을 보이고 있으며, 4% 이하의 변형율을 보이고 있으며 평균 강성치가

9000kg/mm이상으로 유연성이 전혀 없어 권취강판의 적재에 따른 손상의 발생 우려가 크다고 할 수 있다.

고무 관련 재질의 경우 파손은 전단응력에 의해 발생함으로 권취강판의 운행시 하중을 적용할 경우 Wedge에 나타나는 최대 전단응력분포와 결과 값을 아래 Fig. 8에 나타내었다.

고무 부재의 경우 전단응력에 의해 파괴(Crack)가 발생하게 되며, 이러한 구조물의 파손여부는 『Maximum Shear Stress Criterion Theory』를 이용하면 파악할 수 있다.

i) 안전 : $\tau_{max} < \frac{Y}{2}$

ii) 파괴 : $\tau_{max} > \frac{Y}{2}$

여기에서, τ_{max} 는 최대 전단응력, Y는 재료의 항복강도를 나타내고 있으며, 또한, Wedge에 사용된 재질 중 코드지 보다 고무부분에서의 파손이 선행됨으로 고무재질에 대해 우선적으로 검토되어야 한다.

해석결과를 종합적으로 살펴보면, Wedge의 경우 권취강판의 용동이 움직임을 최소화 시켜 주는 역할을 하고 있으며, Wedge의 재질은 등방성이면서 비압축성의 성질을 지니고 있어서 체적이 항상 일정한 방향으로 변화된다. 즉, 변형이 어떻게 이루어지든지 최종적인 체적의 크기는 초기의 체적과 동일하게 된다. 이러한 성질은 외력에 흡수력과 지지력이 강한 것을 의미한다. 흡수력과 지지력이 우수하다고 하더라도 변형이 심하여 삼각형의 Wedge 형상이 심하게 변화되어서는 안 되기 때문에 이러한 점을 주로 파악하였다. 해석결과 Wedge의 변형량 및 변형율이 10.03mm와 8.02%로 나타났다. 또한, 선박 운행중 Wedge의 손상 또는 파손 여부를 검토하고자 고무-코드 복합체의 최대전단응력을 파악하였

으며, Table 6과 같이 운행시 최대전단응력값이 28.5kg/mm²로 나타났다. 이러한 최대전단응력값은 코드혼합고무 재료의 항복강도 70kg/mm²(고무의 경우 Young's modulus 값으로 고려함)에 비해 현저히 낮으며 안전율이 2.46으로써 전체적인 Wedge의 구조물은 안전하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 구조물 해석에 이용된 Wedge를 실제 사용할 경우 변형 및 응력에 의한 손상문제는 없을 것으로 사료된다.

4. 금형설계

Wedge를 시제작하기 위하여 해석결과를 반영하여 Wedge

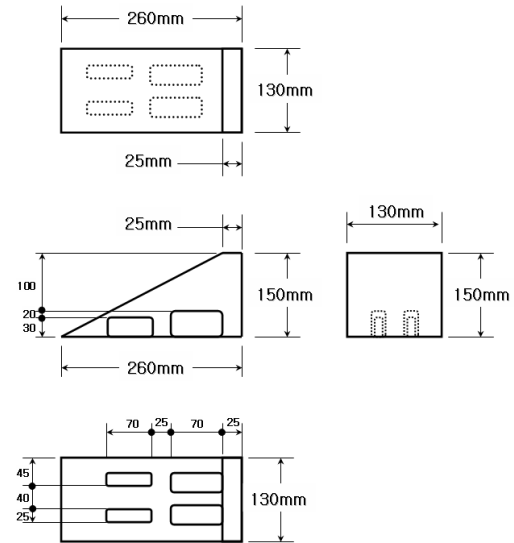


Fig. 9 The Drawing of Wedge

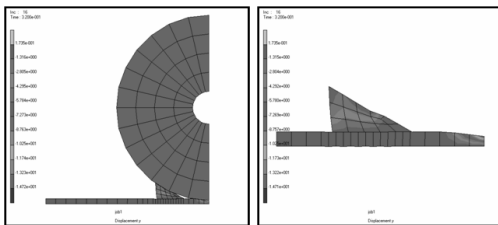


Fig. 8 Shear Stress Distribution of Wedge

Table 6 Shear Stress Distribution Results of Wedge

최대전단응력(kg/mm ²)	안전율	비고
28.5	2.46	적재하중의 2배

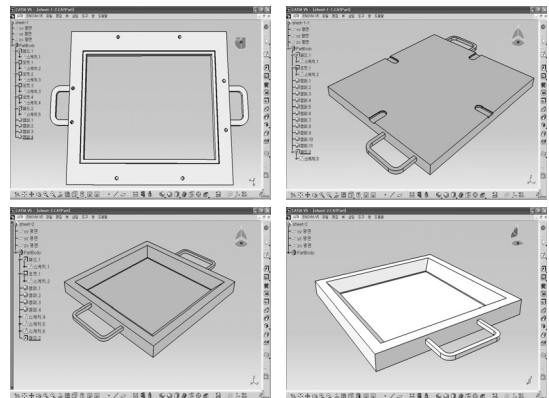


Fig. 10 The Deep Drawing of Sheet

의 형상 및 크기(높이;150mm, 폭;130mm, 길이;260mm)를 Fig. 9와 같이 결정하였다.

Wedge의 반제품제조용 금형으로 두께 5~10mm 정도의 균일한 시트형태의 반제품 생산용 금형으로써 2종으로 구성되어 있다. Fig. 10은 시트금형의 3D 설계도면을 보여주고

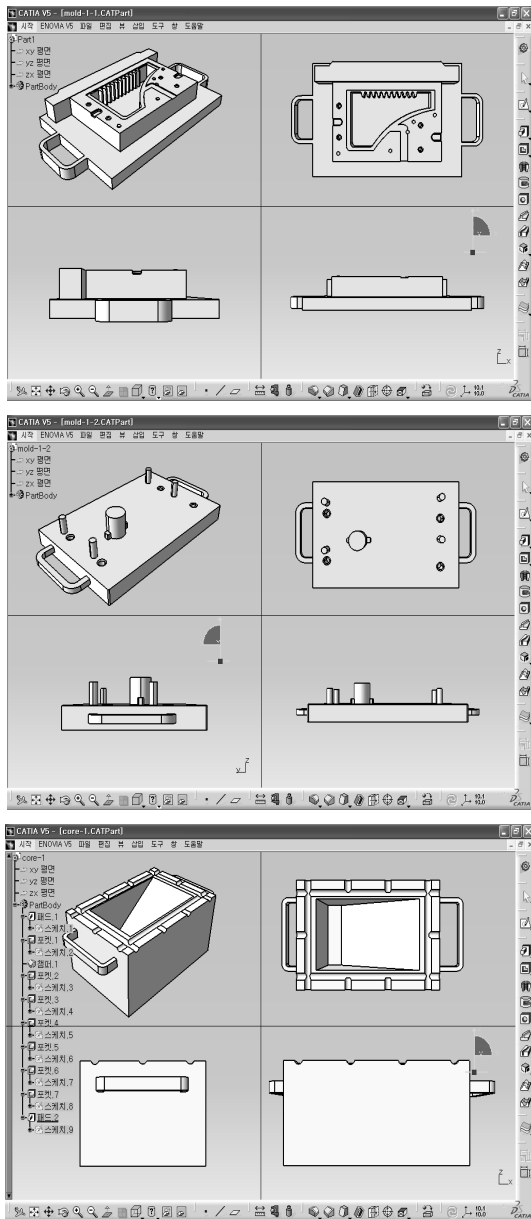


Fig. 11 The Deep drawing of Wedge

있다.

시트형태의 반제품과 코드-고무 스크랩을 이용하여 Wedge의 코어 형태를 유지하도록 성형하는데 필요한 금형으로써 2종으로 구성되어 있다. 아래 Fig. 11은 성형금형 제작을 위한 3D 설계도면을 보여주고 있다.

위와 같이 시트금형과 성형금형에 의해 제조된 반제품의 외곽에 외관상 미려함을 연출하기 위하여 외피고무를 부착하고 권취강판과의 접촉부에 외피고무와의 고착을 제거하기 위하여 나일론 코드지를 부착하여 가류함으로써 완제품을 생산하는 최종 금형이다. 아래 Fig. 12는 완제품금형의 제작을 위한 모델링, 설계도면을 보여주고 있다.

5. 시제품평가

제작된 시트금형, 성형금형 및 완제품금형을 이용하여 권취강판용 Wedge를 시제작하였으며, Fig. 13에 나타내었다.

시제품을 500여개 제조하여 실제 선박운송 Field Test용으로 제공하여 제품성능평가를 시도하였으나, 직경 2미터 크기의 권취강판에 비해 Wedge의 크기는 적고 권취강판 하부에 갇히려 있어서 원하는 강성 값을 측정하기가 매우 곤란하여 만능시험기(UTM; Universal Test Machine, Available

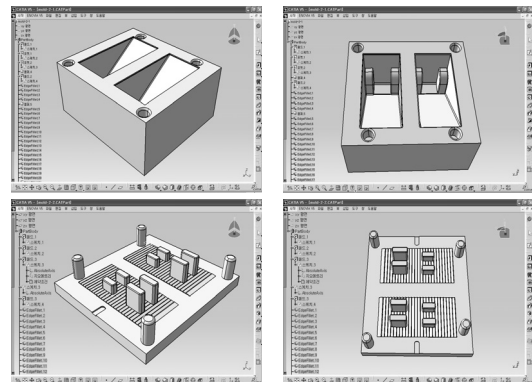


Fig. 12 The Deep drawing of Final Mold for Wedge



Fig. 13 The Photograph of Prototype Wedge

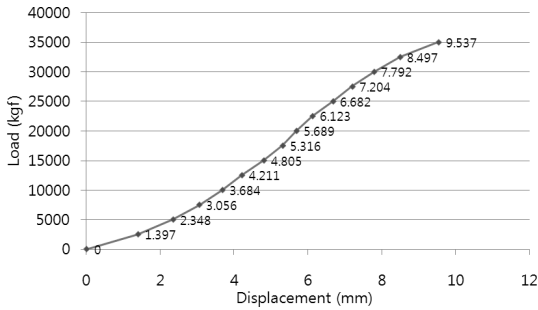


Fig. 14 UTM Test Chart of Wedge

Table 7 Performance Test Results of Prototype Wedge

평가항목 (주요성능)	단위	비중 (%)	목표치	결과치	평가방법
유연성 (Softness)	Kg/mm	30%	5,000 이하	3,670	작용하중 /눌림량
견고성 (Rigidity)	Kg/mm	30%	3,000 이상	3,670	작용하중 /눌림량
회복성 (Recovery)	분	30%	10	4	하중제거 후 복원시간
중량	Kg	10%	10	7	중량측정

Load ; 45Ton)를 이용하여 시제품의 강성 및 강도를 파악하여 성능을 평가하였다. 만능시험기를 이용하여 Wedge에 35,000kg(35톤)을 작용한 결과 초기의 변형량은 심하나 평균적으로 1mm 변형시 3,670kg(3.67Ton)의 하중이 작용함으로써 3,670kg/mm의 강성값을 나타내었다.

Fig. 14에서 나타낸 UTM 시험결과에서 Wedge에 작용하는 하중과 변위를 분석하여 보면 적은 하중에는 변위가 큰 반면 하중이 증가할수록 점차 변위의 증가가 둔화되는 양상을 알 수 있다. 이는 고무제품의 일반적인 특성으로서 대체적으로 초기 변형은 심하나 나중에는 내부 보강재에 의한 강도로 인하여 변형이 감소되는 경향을 지니고 있다.

따라서 특성치인 유연성과 견고성을 파악하고자 상기 시험 결과로부터 하중과 변위의 평균적인 기울기를 계산한 결과 35Ton의 하중작용시 9.537mm의 변위를 나타냄에 따라 평균 강성치(3,670kg/mm)를 구하였다. 이는 목표치인 유연성측면에서 5,000kg/mm이하이며, 견고성 측면에서 3,000kg/mm이상을 동시에 만족하는 결과를 얻게 되었다.

6. 결론

내구성이 우수한 고하중 권취강판 적재운송용 Wedge의 가장 중요시되는 성능은 유연성, 견고성, 회복성 및 경량화이며, 이를 본 연구의 목표로 설정하여 수행하였다. 연구목표 대비 결과를 살펴보면 다음과 같다.

1) 유연성

Wedge상에 고하중 권취강판을 올려 놓고 운송할 경우 Wedge 제품이 너무 딱딱할 경우 권취강판에 흠집 등의 손상을 가하여 소비자의 Claim이 발생될 우려가 높아 이를 해소하고자 적정한 유연성을 지녀야 한다. 반면에 너무 유연할 경우 고하중의 지지능력이 저하되어 Wedge로써의 성능을 가져다 줄 수 없다. 따라서, 유연성을 파악하고자 하중 대비 변형량을 나타내는 강성 값을 구하여 비교함으로써 목표를 달성하도록 하였다. 평균 1mm변형시 3,670kg의 하중이 작용하여 초기 계획하였던 5,000kg이하에 만족한다.

2) 견고성

지나치게 유연할 경우 하중 지지능력저하로 인하여 제품으로서의 사용이 불가능하므로 어느 이상의 견고성을 지녀야 한다. 따라서, 평균 1mm변형시 최소 3,000kg이상의 하중에 견딜 수 있도록 설계하였다. 그 결과 실험을 통하여 본 시제품이 평균 1mm변형시 3,670kg의 하중 지지능력을 나타내고 있음을 확인하였다.

3) 회복성

Wedge는 수회 반복사용이 가능하여야 하며, 이는 사용후 원래 상태로 되돌아 가려는 회복성이 우수하여야 한다. 따라서, 연구목표를 10분 이내에 원래상태로 되돌아가도록 설계한 바 평균 4분 이내에 원상복귀 되었음을 파악하였다.

참고 문헌

- (1) Kwac, L. K., Kim, H. G., Kim, H. W., Han, J. H., Kim, J. Y., 2006, "Stability Analysis of Dunnage for Transportation of a Steel Roll Coil using Powder of Waste Tire and Cord-rubber Scrap", *J. of KSMTE*, Vol.15, No.6, pp. 22~31
- (2) Kwac, L. K., Kim, J. Y., Kim, H. W., Han, J. H., Lee, Y. S., 2006, "Stability Analysis of

- Dunnage for Transportation of a Steel Roll Coil”, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 20 No. 25, pp. 3763~3768
- (3) Kim, H. W., Han, J. H., and Kwac, L. K., 2005, “The Development of Dunnage for Transportation of a Steel Roll Coil”, *Key Engineering Materials*, Vol. 297~300, pp. 339~344
- (4) Halpin, J. C. and Kardos, J. L., 1976, “The Halpin-Tsai Equations : A Review”, *Polymer Engineering and Science*, Vol.16, No.5, pp. 344~352
- (5) Cembrola, R. J. and Dudek, T. T., 1985, “Cord /Rubber Material Properties” *Rubber Chemical and Technology*, Vol. 58, No. 4, pp. 830~856.