2층열차 차체의 구조강도해석에 관한 연구
A Study on the Structural Analysis for the Aluminum Alloy Carbody of a Double-Deck EMU

황원주* 김형진**
Hwang, Won-Ju Kim, Hyeong-Jin

ABSTRACT

In many countries such as Japan, France and so on, the number of double-deck trains has been dramatically increased for the purpose of public traffic. Several researchers have performed feasiblilty studies related to the operations of double deck rolling stock vehicles in Korea since 2001. In recent years, rolling stock vehicles are required to have light weight to save energy consumption and maintenance costs. For these reasons, the standard EMU vehicle developed by KRRI and Kwan-Ju EMU(Electric Multi Unit) are made of aluminum extruded panels. The concept model of a double-deck rolling stock vehicle investigated in this study is also designed to use AEP(Aluminum Extruded Panel). In this paper, the methods related to the structural strength improvements of the car body are proposed through careful modifications of thicknesses and shapes of AEP.

Keyword : Alluminum extruded panel, EMU(Electric Multi Unit), Double-deck rolling stock vehicle

1. 서 론

현재 2층열차는 유럽과 일본, 중국, 이스라엘, 미국등 많은 나라에서 기능적인 특징을 가지고 운행되어지고 있으며, 특히 유럽과 일본 등 많은 나라에서는 출퇴근 통근열차로서 2층열차가 좋은 호응을 받고 점차 운행이 증가하는 있는 추세에 있다. 이는 2층열차가 많은 수송능력과 좌석제공 등을 통해 쾌적하고 편리한 서비스를 제공하며, 또한 기존의 시설물을 그대로 사용할수 있는 점에서 추가의 시설물에 대한 비용이 들지않는다는 장점이 있기 때문이다. 하지만 2층열차는 기존의 전동차보다 부피가 크고 승객의 수가 많기 때문에 무게가 증가한다. 따라서, 우리나라의 기존 선로에 2층열차가 투입이 되어 운행될 경우 그만큼 가벼운 재질을 사용해야 한다. 즉, 2층열차는 차량경량화가 필수적인 차종이라고 할수 있겠다. 국내에서 철도차량의 경량화는 1980년대 초반부터 전동차 및 새마을호 객차 등의 차체소재를 일반 강제에서 스테인레스 강제로 교체되었고 지하철용 전동차의 경우는 스테인레스 강제의 적용이 일반화되었다. 최근에 들어서 스테인레스강보다 더 가볍고 적절한 강도를 가지는 알루미늄 합금이 차체 제작에 적용되어지고 있다. 알루미늄 합금은 재질의 뛰어난 압출성을 이용한 대형알루미늄 압출재로 제작된다. 국내에서 제작된 알루미늄 합금 차량은 표준전동차, 한국형 고속전철, 그리고 광주지하철이 있다. 이러한 알루미늄 압출재는 부피가 크고 일반 전동차에 비해 승객수와 전장품이 많은 2층열차에 있어 적절한 재질이라고 할수 있겠다. 따라서 2층열차의 구체도 가벼운 재질인 알루미늄 합금을 차체의 재질로 적용하게 되었다. 본 논문에서는 2층열차의 개념설계단계에서 차체에 대한 강도해석을 수행하였으며 그 결과를 고찰하고 향후 2층열차 차체설계의 기초자료로 삼고자 한다.

2. 2층열차 차체의 개념설계 및 강도해석

2.1 2층열차 차체의 개념설계

2층열차의 모든 설계제원은 차량과 터널의 인터페이스를 고려하여 1~4호선 기준의 차량한계 이내에서 외국의 2층열차 차량을 벤치마킹하여 국내 실정에 맞게 설정하였다. 2층열차 차체의 너비와 높이는 승강장의 높이와 길이, 차량한계, 승객의 키, 입석위주나 좌석위주냐 등 여러 가지 점들을 고려하여 결정하여야 한다. 차체길이 및 폭은 역내 시설을 고려하여 기존열차들과 동일하게 19500 ㎜, 3120 ㎜으로 결정하였다. 2층열차 설계에서 가장 중요한 차량높이는 1층과 2층의 승객들이 입석시 이동의 불편이 없도록 하기 위하여 4190 ㎜(레일상면기준)까지 증가시켰으며, 1,2층

실내의 높이는 1920 ㎜, 1975 ㎜로 결정하였다. 출입문의 폭은 1층과 2층 승객의 원활한 출입을 위하여 기존열차보다 폭이 넓은 2000 ㎜, 높이 1880 ㎜으로 설계하였다. 출입문의 위치는 기존 승강장의 높이를 고려하여, 국유철도건설규칙에서 정해진 바와 같이 레일상면 기준으로 1150 ㎜ 높이에 출입문을 설치하였다. 2층열차는 크게 측구조(side structure), 지붕구조(roof structure), 마루구조(under frame structure), 중간 마루구조(intermediate structure)의 복합 구조로 구성되어 있다. Fig. 1은 2층열차의 3차원 모델이며, 2층은 좌석위주로 되어 있고 1층은 우리나라 지하철 전동차와 같이 입석위주로 설계되어졌다. 한편으로 승객들의 원활한 승하차를 위하여 2층과 1층 출입문 부위에 접이식의자를 배치하여 편의성을 도모하고자 하였다.

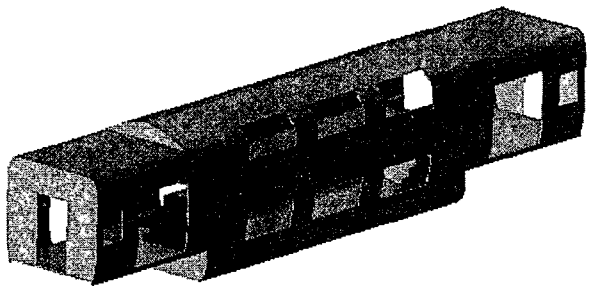


Fig. 1 2층열차의 3차원 모델

차체에 사용되는 알루미늄 압출재의 형상은 아주 다양하게 제작이 가능하다. 대형 알루미늄 알출재는 판재의 절단 및 조립에 소요되는 시수를 단축하는 데에 장점이 있으므로 가능한 한 대형화하는 것이 좋다. 그런데, 압출재는 금형을 통해서 생산되므로 압출재의 크기는 금형 및 압출에 소요되는 프레스의 용량에 따라 한계가 주어진다. 또한 압출재의 형상은 알루미늄 압출재 생산업체에서 산출된 규정을 따라 설계제작 되어지고 있다. 현 동양강철에서 보유하고 있는 압출 프레스의 용량이 8000톤인데 이 압출기를 통해서 생산할 수 있는 압출재의 폭은 600㎜, 깊이는 85㎜ 이하로 하는 것이 적합하다고 보고 있다. 여기서, 폭과 깊이는 반드시 정해진 것은 아니며 어떻게 설계하느냐에 따라 달라질 수 있다. 어떤 프로파일이든지 금형에 따라 가능하지만 최적적인 설계를 하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 너무 깊이를 작게 하면 촘촘해 지므로 압출이 어렵게 될 수 있다. 일반적으로 압출재의 두께는 2.5㎜이하는 뽑을수가 없기 때문에 2.5㎜이상으로 설계하여야 한다. 또한 보통 빌렛 1톤을 사용하여 압출재를 뽑으면 700 ㎏정도만 사용된다고 한다. 2층열차의 압출재의 형상과 두께는 해외와 국내의 알루미늄 압출재 차량을 참조하였으며, 2층열차에 맞게 약간의 수정을 하여 설계하였다.

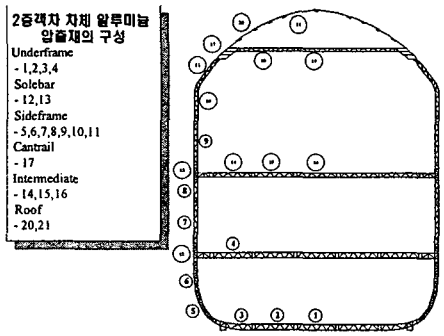


Fig. 2 2층객차 차체의 압출재 구성

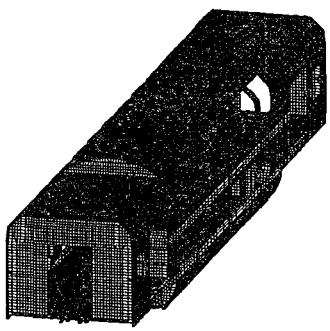


Fig. 3 2층열차의 유한요소모델

하지만, 알루미늄 압출재는 업체의 생산 능력을 감안하여 최적의 형상으로 결정하여야 한다. 2층객차 차체의 알루미늄 압출재는 Fig. 2와 같이 21종의 압출재로 구성되어져 있다. 이상에서 언급

한 2층열차에 대한 기본제원을 토대로 2층열차 차체 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용한 상용 유한요소해석프로그램은 NISA Ⅱ/DISPLAYⅢ이며, 셀요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3는 유한요소모델을 나타낸 그림이다.

2.2 2층열차의 공차중량 및 승객하중

T-car는 기존의 전동차에 들어가는 전장품들을 2층열차에 맞게 적용하였으며, 좌석승객수와 입석승객수를 계산하여 승객하중을 계산하였다. 강도해석을 위한 최대 승객하중값은 1층(입석위주)은 우리나라의 기존 전동차와 비슷하므로 도시철도차량 표준사양기준을 적용하였고, 2층은 좌석위주로 유럽의 전동차와 비슷하므로 UIC기준을 적용하였다.

2.3 재료의 기계적 성질 및 해석시 적용하중값

Table 1에 압출성및 가공성이 뛰어난 2층열차 재질인 A6005A에 대한 기계적 성질을 나타내었다. 해석방법은 철도차량 구체의 하중시험방법에 의거하여 수행하였으며, 적용모델은 T-car이다. 위에서 언급한 사항을 근거로 모델링을 하고 해석을 수행하였으며, 해석은 수직, 압축, 비틀림하중에 대하여 수행하였다. Table 2는 각 조건에 해당하는 하중값을 정리하여 나타낸 표이다.

Table 1 사용재질의 기계적 성질

Material	Tensile Strength (kg_f/mm^2)	Yield Strength (kg_f/mm^2)	Elastic Modulus (kg_f/mm^2)	Poisson's Riatio	Density (kg/mm^2)
A6005A	26.5	21.9	7.3×10^3	0.33	2.7×10^{-6}

Table 2 해석시 적용한 하중값

Case		하중값(톤)	비고
*수직하중	1층	62	(공차중량+최대승객하중-대차중량)×(1+동하중계수) = 62 ton(동하중계수 = 0.2)
	2층	9	UIC 566 OR 기준 참조
*압축하중		50	▸ 커플러 압축하중
		14.37	▸ 공차수직하중 = 공차중량-대차중량-차체중량 = 34.37 - 11 - 9 = 14.37 ton
*비틀림하중		4ton·m	

*JIS E 7105 철도차량구체의 하중시험 방법

2.4 해석결과

각 경우에 대하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 4~6 및 Table 5에 나타내었다.

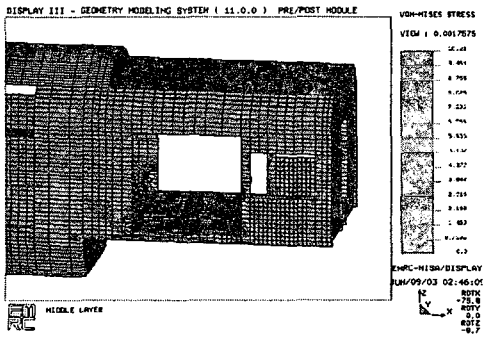


Fig. 4 수직하중시 최대응력 발생부위

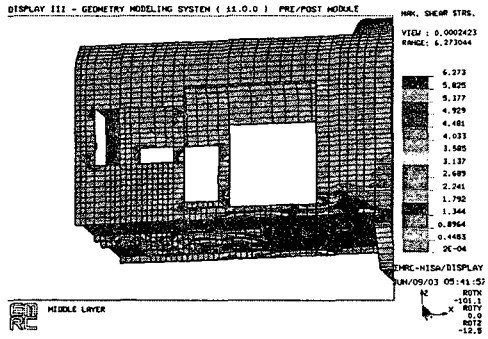


Fig. 5 압축하중시 등가응력분포

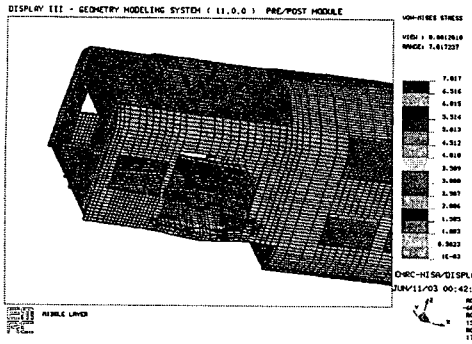


Fig. 6 비틀림 응력에 대한 등가응력분포

Table 5 해석결과 정리

CASE		최대응력및 변형량	허용응력 및 처짐량(㎜)	발생부위
수직하중	최대응력	10.2kg/㎟	12.4	출입문 모서리 부위
	처짐량	10 ㎜	대차간거리의 1/1000	언더프레임솔바의 중앙부
압축하중	최대응력	6.27kg/㎟	12.4	센터실 끝단
비틀림하중	최대응력	7 kg/㎟	8.7	출입문 모서리 부위

결과에서 알수 있듯이 모든 경우에 대하여 허용치 이내를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 2층열차의 강도해석 비교

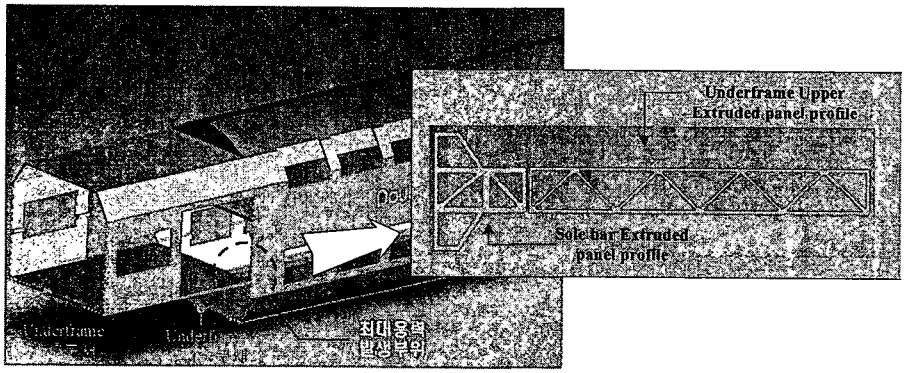


Fig. 7 해석시 최대응력발생부위의 압출재

해석결과 앞에서도 언급하였지만 수직하중시 최대발생부위는 Fig. 7에서와 같이 솔바의 모재부였으며, 이 부위의 솔바와 언더프레임의 형상을 나타내었다. 국내에서 제작되고 있는 기존의 전동차의 언더프레임의 높이는 80.5㎜로 설계되어 있지만 이 높이에 대해서는 다소 강성측면에서 높게 설계되었다는 연구결과가 있고 또 2층열차의 경우 80.5㎜로 언더프레임의 높이를 설계할 경우 1,2층 승객들의 높이를 확보할수 없기에 높이를 70㎜로 설계하였다. 여기서, 높이에 따른 압출재의 중량과 응력의 추이를 살펴보기위해 Fig. 8과 같은 압출재 형상에 높이를 달리하여 이를 검토하였다. 압출재의 두께는 2.5, 2.8, 3㎜를 서로 조합하여 Fig. 9와 같이 동일한 조건하에서 비교하여 검토하였다. 두께를 이렇게 정한 것은 현재까지 제작된 압출재의 두께를 적용한 것이고, 2.5㎜이하는 뽑을수가 없기 때문이다.

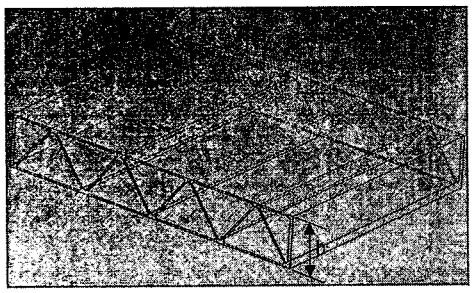


Fig. 8 압출재 형상 모델(언더프레임)

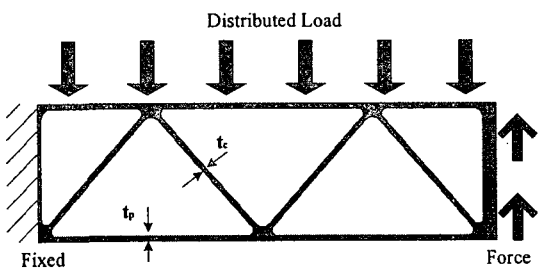


Fig. 9 압출재모델의 해석조건

또한 두께의 경우 중량은 높이가 70㎜, t_p, t_c가 각각 2.5㎜일때 가장 적었으며, 응력에 있어서는 높이가 80.5㎜, t_p, t_c가 각각 3㎜일때 가장 적게 나타났다. 결과 Fig. 10과 11에 나타난 것처럼 높이가 작을수록 중량은 감소하나 강도측면에서 약간 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 각각의 경우에 대한 모델번호는 Table 4 와 같다.

Table 4. t_p와 t_c에 따른 모델 No.

모델 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_p	2.8	3	2.5	3	2.5	2.8	2.8	3	2.5
t_c	2.8	2.8	2.8	2.5	2.5	2.5	3	3	3

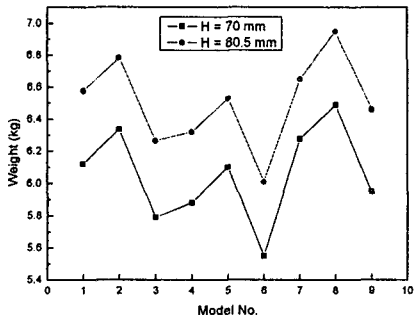


Fig. 10 언더프레임의 높이에 따른 중량비교

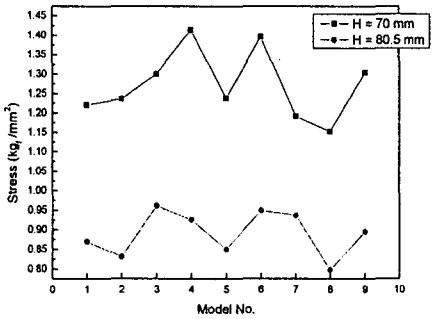


Fig. 11 언더프레임의 높이에 따른 응력비교

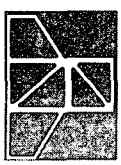
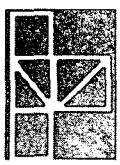
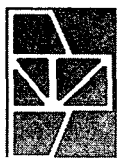
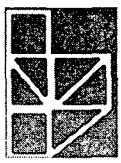
이상에서의 결과를 가지고 전체 모델에 대하여 적용하여 높이에 따른 응력값의 변화를 살펴보았는데, 이를 Table 5에 정리하였다. 결과를 통해 최대응력이 발생하는 부위인 언더프레임 위쪽 부재는 압출재의 높이를 80.5㎜로 하고 아래부재는 70㎜로 했을 때, 중량에 있어서 약간의 증가는 있으나 강도측면에서 약간의 향상을 확인할수 있었다.

Table 5 언더프레임 압출재의 높이에 따른 중량과 응력값

1층바닥 위쪽부재의 높이(㎜)	1층바닥 아래쪽부재의 높이(㎜)	2층바닥의 높이(㎜)	전체중량 (ton)	최대응력 (kg/㎟)
80.5	70	70	7.15	9.5
80.5	80.5	70	7.18	9.5
70	70	70	7.12	10.2

아울러 솔바의 압출재에 대해서도 Table 6에서와 같이 몇가지 모델을 제시하고 중량을 감소시키면서 적절한 강도를 가질수 있는 형상을 찾고자 하였다. 형상에 따른 중량과 응력값에 대한 결과를 Fig. 13,14에 나타내었다. 이 결과를 통해 모델 3이 중량과 응력측면에서 가장 적절한 것으로 판단되어 적용하였다. Table 7에 t_1와 t_2에 따른 각각의 경우에 대해 나타내었다.

Table 6 솔바의 압출재 형상

			
Original	모델1	모델2	모델3

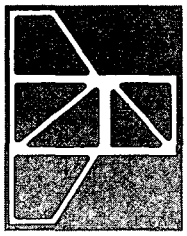


Table 7. t_1와 t_2에 따른 Case No.

Case No.	1	2	3	4
t_1	7	10	7	10
t_2	10	7	7	10

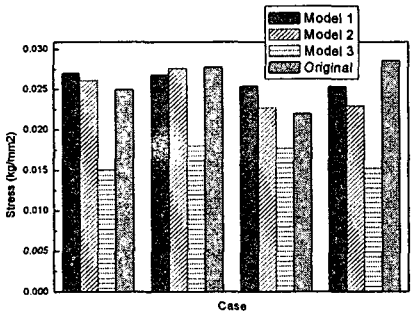


Fig. 13 솔바 모델에 따른 응력값의 비교

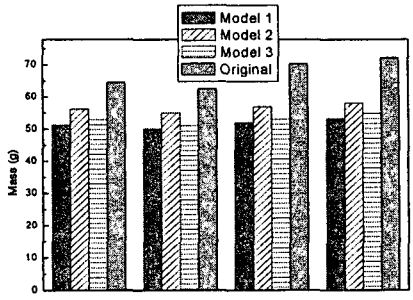


Fig. 14 솔바 모델에 따른 질량값의 비교

이상에서 최대응력발생부위에 언더프레임과 솔바 부재에 대해 국부적인 해석를 하고 적절한 형상을 찾으려 하였다. 이때, 언더프레임의 경우 1층바닥의 위쪽부재의 높이를 80.5㎜, 아래바닥의 경우 70㎜, 솔바의 경우 case 3의 경우가 가장 적절한 것으로 판단되었다. 이러한 모든 결과를 전체모델에 적용하여 해석을 수행하였다. 처음 모델과 변경된 모델과의 중량과 해석을 값의 결과를 Table 8에 정리하였다. 결과 중량은 다소 증가하였으나 응력에 있어서 향상이 있었음을 확인할수 있었다.

Table 8 처음 모델과 변경후 모델의 비교정리

전체모델	1층바닥 위쪽부재의 높이(㎜)	2층바닥의 높이(㎜)	전체중량 (ton)	최대응력 (kg/㎟)
변경전 모델	70	70	7.12	10.2
변경후 모델	80.5	70	7.23	8.01

4. 결론

① 알루미늄 압출재를 적용한 2층열차의 개념설계를 하였다. 2층열차는 모두 21종의 압출재로 구성되어지며, 마루구조와 중간마루구조, 솔바구조 등 몇개의 복합구조로 이루어져 있다. 우리나라의 실정에 맞게 차체길이와 폭을 결정하였으며, 출입문의 높이와 폭은 승하차의 편의성을 고려하였으며 1층과 2층의 의자배치는 많은 수송능력과 아울러 승객들의 쾌적함까지도 고려하여 설계하였다.

② 2층열차에 대한 구조강도해석을 수행하였으며 수직하중일 때 출입문 모서리 부위에 최대등가응력으로 10.2kg/㎟, 처짐량은 10㎜가 나왔다. 압축하중일 경우 최대등가응력으로 6.27kg/㎟이었으며, 비틀림하중일 경우 7kg/㎟이었다. 모든 경우에 있어서 허용치이내를 만족하고 있었으며, 2층열차는 구조강도상 안전한 것으로 판단된다.

③ 언더프레임의 경우 동일한 조건하에서 두께와 높이를 변화시켜가며 적절한 강도를 가지면서 중량이 가벼워지는 형상을 찾았으며, 이를 전체 모델에 적용하여 해석해 보았다. 이때 중량은 처음의 중량보다 0.5%정도 다소 증가하였으나, 강도측면에 있어서 향상을 확인할 수 있었다. 또한 솔바의 압출재 형상에 대해 4가지 모델을 소개하고 가장 적절한 압출재를 선정하여 다시 전체모델에 적용하였다. 종합적으로 보면 변경전 모델보다 전체중량은 다소 증가하였으나 응력의 향상을 확인할수 있었다. 알루미늄 합금의 AEP 방식으로 제작된 2층열차는 전부 21종의 압출재로 구성되어진다. 따라서 압출재의 형상과 두께에 따라서 중량의 감소와 좀더 나은 강도와 강성을 갖는 차

체를 설계할수 있을 것이다. 적절한 강도와 두께를 갖는 압출재의 형상과 두께에 대한 연구는 차체의 중량의 감소뿐만아니라 강도와 강성에 있어서도 향상을 가져올 것이다. 압출재의 두께는 압출기의 성능과도 연계되어 있는 문제이므로 향후 이론적인 최적화와 성형성을 함께 고려한 parametric study를 통해 중량을 감소시키면서도 강도를 증대시키는 연구가 필요하다.

5. 참고문헌

1. 한국철도기술연구원, "2층 급행열차 운행을 위한 기술 개발 및 설계기준에 관한 연구", 건설교통 기술혁신사업 제1차년도 연차보고서,2002
2. 황원주외 3인, "Al 압출재 및 SUS 2층열차 차체의 강도 해석 비교 검토", 철도학회 추계학술대회 논문집,pp801-806,2002
3. 김형진외 4인, "2층열차 차량 모델에 관한 기초 연구",철도학회추계학술대회논문집, pp826-833,2002
4. 황원주외 3인, "알루미늄 압출재를 적용한 2층열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석", 철도학회 춘계 학술대회논문집,pp364-369,2002
5. "도시철도표준사양""건설교통부,1998.2
6. "도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준"" 건설 교통부, 2000.5
7. 軌道車輛構体の荷重試験方法,JIS E 7105
8. 한국철도기술연구원, "전동차 표준사양 연구보고서", 1997
9. UIC 566 OR
10. Center for Engineering and Compurter Technology, "NISA II User's manual", Vol. I, EMRC
11. "철도차량구체의 하중시험 방법", 일본공업규격 JIS E 7105, 1988
12. "Wrought Aluminum and Aluminium Extruded Sections", Part1, DIN 1748, 1983
13. "철도차량용 알루미늄 합금 용접 이음의 설계 방법", 일본공업규격 JIS E 4050, 1992