

고층 사다리차 붐의 경량화 설계에 관한 연구

김진수*

(논문접수일 2006. 5. 19, 심사완료일 2006. 7. 18)

A Study on the Weight-saving Design of the Boom in High Ladder Vehicle

Kim Jin-Soo*

Abstract

The purpose of this study is to reduced the weight of ladder boom and to improve the manufactor process by the section modification. The Conventional model consists of integral section stiffener, while the proposed model consists of truss type stiffener to reduce the weight of ladder boom and wind effector. In the two analysis models, one is based on the single boom, and the other is based in the coupling model of two booms. We present the analysis results for the case when applying the weight, bending and twisting moment and wind pressure. Finally, a comparison between these results is presented to show the performance of our method.

Key Words : Ladder(사다리), Boom(붐), Stiffener(보강재), Weight-saving(경량화), Model(모델)

1. 서론

최근 주거문화는 단독 주택형태에서 고층형 아파트 및 주택이 많아지는 추세이다. 아파트 및 건물이 고층화됨에 따라 국내 고가 사다리차업계의 추세는 좀더 높은 곳에서 작업할 수 있는 고가 사다리차를 개발하는 것이다. 사다리차의 화물 적재함이 보다 높은 작업 반경을 갖기 위해서는 다수의 붐(Boom)으로 구성되는 다단 붐을 활용한다.

평상시 사다리차의 다단 붐은 모든 단이 하나로 포개져 있다가 사용 시에는 각 단이 길게 연장되어 일종의 외팔보(cantilever) 형태가 되고 이러한 상태에서 적재대에 화물이

적재되게 된다. 최대 신장된 상태의 사다리는 구조물의 폭이나 높이에 비해 길이가 늘어나 강도와 강성이 저하되어 불안정하게 된다. 적재대에 실린 화물의 하중까지 붐에 작용하게 되면 붐이 꺾이거나 부러지는 등 파손될 가능성까지 있다⁽¹⁾. 기존 모델에서는 용접이 필요하며, 설계에 있어서 어려움이 있는 트러스 구조보다는 일반적인 방법인 측면부재와 수평부재가 일체형인 붐을 채택했다. 사다리의 신장 거리가 높아감으로 붐의 제원도 커지게 되었으며 다음과 같은 문제점이 발생하게 되었다.

기존 붐 구조물은 크기가 큰 일체형의 붐 구조물을 압출성형하므로 제조원가가 많이 소요된다.

* 전주대학교 기계자동차공학과 (jskim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

기존 붐은 무거운 중량이므로 상하이동, 신축작동 등을 위한 유압장치에 고출력이 요구된다.

기존 붐 구조물은 일체형 부재이므로 작업 중 강한 바람이 부는 경우 바람의 영향을 많이 받게 되어 좌우로 큰 흔들림이 발생하여 안전성을 저하시킬 가능성이 있다.

이상의 문제점을 해결하기 위해서는 기존의 붐 구조물과 동등한 강도를 가지면서도 제작이 용이하고, 중량과 제조원가를 절감할 수 있는 새로운 개념의 붐 설계가 필요하다. 본 논문에서는 고차 사다리 소방차의 붐에 사용되는 트리스 측면구조를 고층 사다리차에 적용함으로써 경량화 하는 방법을 제안한다.

본 연구에서는 구조해석프로그램인 ANSYS⁽²⁾을 이용하여 기존 붐과 경량화 붐에 대해서 자중, 굽힘, 비틀림, 풍압(Wind pressure)에 대한 각각의 해석을 수행한다. 그 결과를 비교 분석하여 제안하는 경량화 붐 모델의 타당성을 나타낸다.

2. 기존 모델과 경량화 모델

최대 작업높이가 53m인 9개단의 붐으로 구성된 사다리

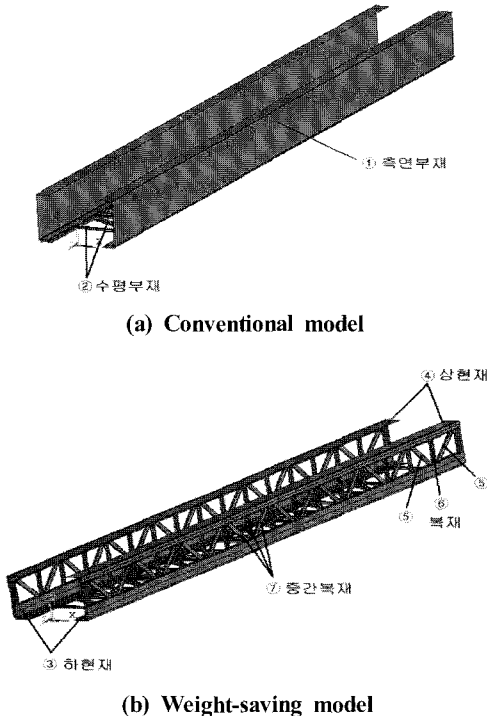


Fig. 1 Boom of high ladder vehicle

차를 대상으로 한다. 본 논문에서는 사다리차의 중요한 지지 붐이며 제일 하단부에 위치하는 9번 붐과 8번 붐에 대한 해석을 수행한다. 일반적으로 기존 사다리차 붐 구조물은 Fig.1 (a)처럼 다수의 수평부재(②)와 상기 수평부재(②)의 양측에서 수직방향으로 결합되며 서로 대향하는 한 쌍의 측면부재(①)를 포함하여 이루어진다. 강도 및 강성 조건을 만족하기 위해서 붐 구조물의 측면부재(①)를 일체형으로 형성한다. 또한 측면부재(①)는 알루미늄 재질이며 압출 성형하여 제작한다.

그러나 작업공정의 어려움과 많은 재료비 때문에 Fig. 1 (b)와 같이 트리스구조로 이루어진 새로운 모델을 제안한다. 트리스는 직선부재를 평면상에서 연속적으로 3각형을 형성하도록 조립한 구조체를 말하는데 보통 위아래에 가로로 길게 뻗은 두 개의 부재가 있고 그 사이에 짧은 부재들이 수개 조립되어 정삼각형과 역삼각형을 번갈아 가면서 형성하는 형태로 구성된다. 이때 트리스의 위와 아래에 가로로 길게 뻗은 부재를 각각 상현재(④)와 하현재(③)라 하고, 상현재와 하현재 사이에 조립되는 부재를 복재(⑤, ⑥, ⑦)라 한다.

경량화 모델은 기존 모델과는 달리 측면부재는 일체형이 아닌 구조를 갖는다. 즉 상현재, 하현재 및 다수의 복재로 구성되며 각각 용접으로 결합한다(이하 기존 모델을 CON 모델로, 경량화 모델을 WS 모델이라 약칭한다).

3. 붐 해석모델

사다리차의 9번 붐과 8번 붐의 재원은 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

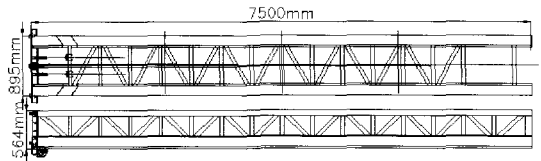


Fig. 2 Geometries of 9th boom

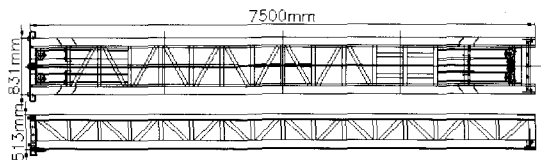


Fig. 3 Geometries of 8th boom

3.1 유한요소 정식화

본 논문에서 이용된 유한요소해석 기법은 3차원요소(3-D Solid Element)를 이용하며, 물성특성(Material property)으로는 탄성체로 고려하여 해석한다. 이러한 문제의 특성을 고려한 유한요소 수식은 다음과 같이 정식화 한다⁽³⁾.

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \psi_x^T & 0 & 0 \\ 0 & \psi_y^T & 0 \\ 0 & 0 & \psi_z^T \\ 0 & \psi_z^T & \psi_y^T \\ \psi_z^T & 0 & \psi_x^T \\ \psi_y^T & \psi_x^T & 0 \end{bmatrix} (\psi_x \psi_y \psi_z) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \psi_x^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial x} \right], \\ \psi_y^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right], \\ \psi_z^T &= \left[\frac{\partial u}{\partial z} \quad \frac{\partial v}{\partial z} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \right], \\ d\hat{\epsilon} &= \frac{1}{2} d(\hat{A}\hat{\psi}) = \frac{1}{2} d\hat{A}\hat{\psi} + \frac{1}{2} \hat{A}d\hat{\psi} \end{aligned} \quad (3)$$

형상함수 N 과 절점 매개변수 \hat{a} 의 향으로 변위 $\hat{\psi}$ 을 나타내면 $\hat{\psi} = \hat{G}\hat{a}$, $d\hat{\epsilon} = \hat{A}\hat{G}d\hat{a}$ 와 같다. 이때, 변형률행렬 B 는 다음과 같이 표현된다.

$$B = \hat{A}\hat{G} \quad (4)$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

또한, 재료의 물성에 대한 행렬 D 는 E 와 ν 는 탄성체의 영률과 프와송비로 다음과 같이 나타낸다.

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 응력 $\hat{\sigma}$ 와 변형률 $\hat{\epsilon}$ 와의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = D\hat{\epsilon} \quad (7)$$

따라서 임의의 3차원 요소에 대한 강성행렬과 유한요소해석 정식(Finite Element Formulation)은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$k^e = \int_v B^T D B dv^e \quad (8)$$

$$f^e = k^e \hat{a} \quad (9)$$

여기에서, f^e 는 작용력 벡터(Applied or Reaction Force vector), k^e 는 요소 강성행렬(Element stiffness matrix)이며, \hat{a} 는 절점의 매개변수 벡터(Nodal displacement variables vector)를 나타낸다.

3.2 붐의 해석

붐 구조물의 재질은 고강도 특수 알루미늄합금(Al 6061)이며 물성치는 Table 1과 같다. 실제 고가사다리차에서 맨 아랫부분이 고정되어 위로 올라가기 때문에 두 모델을 외팔보로 간주하여 Fig. 4와 같이 유한요소 모델을 작성하였다.

Table 1 Material properties of boom

Material	Density ρ [kg/mm ³]	Modulus of Elasticity E [N/mm ²]	Poisson's Ratio ν
Aluminum 6061	2.74E-06	7.1705E+06	0.33

Fig. 4에 나타내는 바와 같이 한쪽 끝에 구속조건을 주어 자중이 작용하는 경우, 굽힘 응력이 작용하는 경우, 비틀림 응력이 작용하는 경우, 풍압이 작용하는 경우에 대해서 각각 해석을 수행한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 붐 구조물의 자중에 의한 변형량과 응력 분포를 나타낸다.

굽힘에 대한 해석은 측면부재의 하단부를 구속하고 측면부재를 연결하는 수평부재의 가장 상단에 있는 부재에 5000[N]의 하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 비틀림에

대한 해석은 측면부재의 오른쪽 끝의 양쪽에 중력이 작용하는 방향으로 ±5000N의 하중을 적용하여 해석하였다.

바람의 영향에 대한 해석은 붐의 오른쪽 측면에서 10[m/s]의 바람이 분다고 가정을 하고 다음 식을 이용하여 풍압을 적용한다.

$$P = c\rho \frac{v^2}{2} \quad (10)$$

여기서, 항력계수 c 는 2.1, 단위기압 상온에서의 공기의 밀도 ρ 는 1.2[kg/m³], 바람의 속도 v 는 10[m/s]으로 설정하였다. 이 경우의 단위면적에 수직으로 부는 바람의 압력 P 는 0.126E-03[N/mm²]이다. 측면부재의 오른쪽 측면에 풍압 P 를 적용하여 해석을 수행하였다.

이상의 실험 결과를 Table 2에 나타내며, 그 결과로부터 최대 응력에 있어서는 굽힘과 풍압에 있어서 경량화 모델이 우수하며, 최소 응력에 있어서는 비틀림을 제외한 모든 값에서 경량화 모델이 우수하며, 변형량에 있어서는 자중을 제외한 값에 모든 값에 있어서 우수함을 알 수 있다.

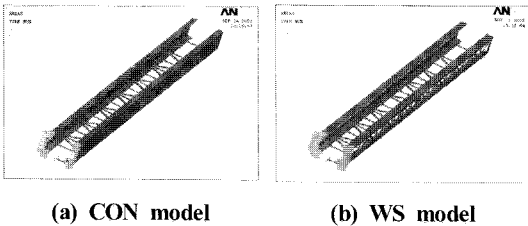
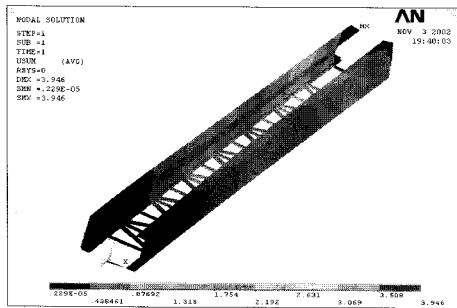
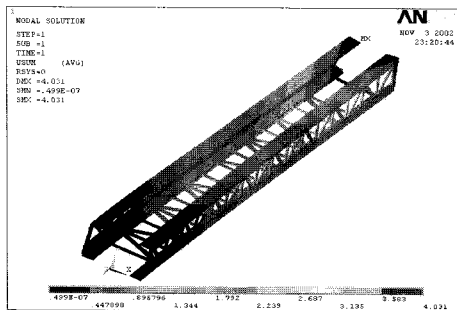


Fig. 4 Finite element model and boundary condition of 9th boom

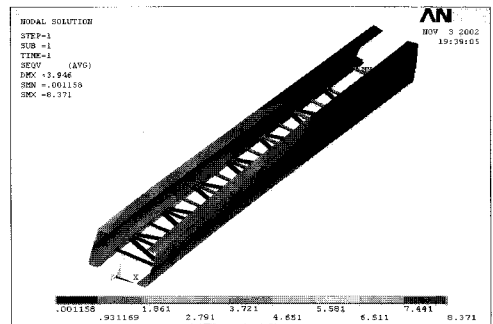


(a) CON model

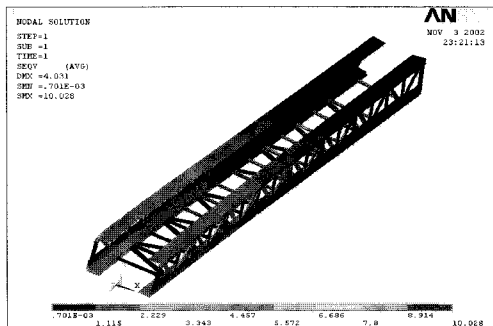


(b) WS model

Fig. 5 Deflection distribution of boom with boom weight



(a) CON model



(b) WS model

Fig. 6 Stress distribution of ladder with boom weight

Table 2 Analysis results of coupling boom

Type	Model	Stress[N/mm ²]		Deflection [mm]
		Maximum	Minimum	
Weight	CON	8.371	0.116E-02	3.946
	WS	10.028	0.701E-03	4.031
Bending moment	CON	131.483	0.427E-02	19.822
	WS	112.682	0.255E-02	19.033
Twisting moment	CON	73.330	0.722E-02	39.220
	WS	90.121	0.01293	31.479
Wind pressure	CON	10.592	0.495E-03	2.144
	WS	3.841	0.113E-03	0.466

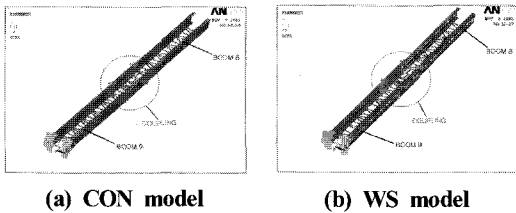


Fig. 7 Finite element Model and boundary condition of coupling 8th and 9th boom

3.3 결합 붐의 해석

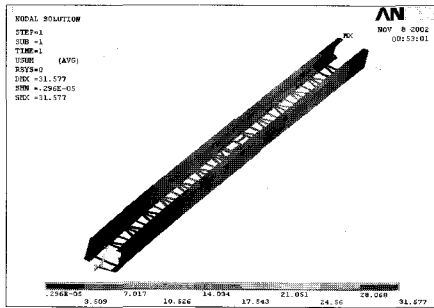
본 절에서는 8번 붐의 유한요소 모델을 작성하며, 8번과 9번 붐이 겹치는 2m 구간에 ANSYS의 Coupling 속성을 적용하여 결합모델을 작성하였다.

Fig. 7은 결합 모델(Coupling model)의 두 단이 실제 작업상황과 동일하게 신장된 경우를 나타낸다.

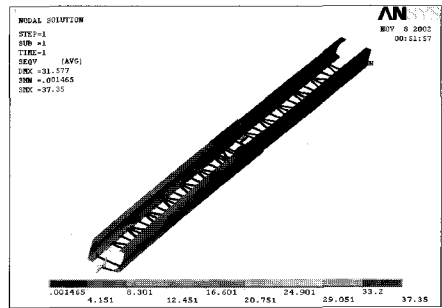
자중에 의한 변형분포와 응력분포를 비교하기 위해 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 8와 Fig. 9에 나타내었다.

Table 3 Analysis results of coupling boom

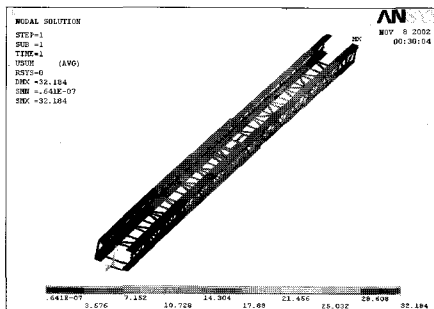
Type	Model	Stress[N/mm ²]		Deflection [mm]
		Maximum	Minimum	
Weight	CON	37.350	0.147E-02	31.577
	WS	46.527	0.641E-03	32.184
Bending moment	CON	3,888	0.1002	1,334
	WS	3,001	0.110E-03	1.271
Twisting moment	CON	370.053	0.625E-02	126.684
	WS	327.026	0.173E-03	109.419
Wind pressure	CON	29.372	0.147E-02	7.272
	WS	12.225	0.314E-05	2.293



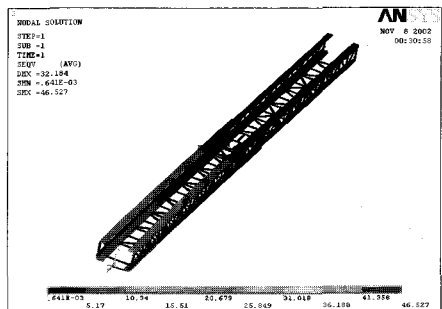
(a) CON model



(a) CON model



(b) WS model



(b) WS model

Fig. 8 Deflection distribution of coupling boom with boom weight

Fig. 9 Stress distribution of coupling boom with boom weight

Table 4 Analysis results for number of stiffener

	Model	Stress[N/mm ²]		Deflection [mm]
		Maximum	Minimum	
Weight	15	7.667	3.988	3.988
	17	7.578	4.022	4.022
	19	7.685	3.914	3.914
Bending moment	15	26.166	16.128	16.128
	17	25.555	16.020	16.020
	19	23.570	15.374	15.374
Twisting moment	15	92.935	19.683	19.683
	17	114.96	20.256	20.256
	19	84.427	19.362	19.362

Table 3은 3.1절의 해석 방법과 동일하게 자중, 굽힘, 비틀림, 풍압에 대한 해석 결과 값을 나타낸다.

Table 3으로부터 변형분포와 최대 응력이 있어서는 자중을 제외한 모든 값에서 경량화 모델이 우수하며, 최소 응력에 있어서는 모든 값에서 경량화 모델이 우수함을 나타낸다.

3.4 측면 부재의 개수에 따른 강도 변화

본 논문에서 제안하는 경량화 모델은 수직으로 세워진 측면 부재가 17개로 이루어져 있다. 본 절에서는 수직으로 세워진 측면 부재의 개수를 다르게 설정한 모델을 작성하여 사다리의 강도변화의 해석을 수행하였다. 해석모델은 본 논문에서 제안하는 모델의 측면부재 17개에서 15개, 19개로 변화를 주어 자중이 작용하는 경우, 굽힘이 작용하는 경우, 비틀림이 작용하는 경우에 대해서 해석을 수행하였다. Table 9는 각각의 결과를 나타내며, 그 결과로부터 자중의 최대 응력을 제외하고 굽힘, 비틀림의 경우 모두 측면 부재의 개수가 19개일 때 변형량과 최대 응력이 우수함을 알 수 있다. 경량화 모델의 측면 부재의 개수를 17개에서 19개로 변경하게 되면 변형량과 최대 응력은 작아지지만 부재를 더 추가해야하므로 그만큼 공정시간, 중량, 생산원가가 증가될 것이다.

4. 결론

단일 붐과 결합한 붐에 대해서 유한요소 모델을 작성하여 해석을 수행하였다. 이상의 결과로부터 자중을 적용했을 경우만 제외하고 굽힘, 비틀림, 풍압을 적용한 경우는 경량 모델이 기존 모델보다 변형량과 응력 면에서 우수함을 알 수 있었다. 특히 풍압이 작용하는 경우 경량 모델이 기존 모델보다 변형량과 응력 면에서 모두 우수함을 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 논문에서 제안한 경량화 모델은 타당성이 있음을 알 수 있으며, 경량화 모델을 사다리차에 도입함으로써 다음과 같은 효과를 얻을 수 있을 것이라 예상된다.

- (1) 붐 구조물의 측면부재에 일체형의 대형 패널을 이용하지 않으므로 붐 구조물의 측면부재의 제작이 용이해지고 사용되는 원자재의 양을 줄일 수 있다. 그러므로 사다리차의 붐 구조물의 생산원가를 대폭 절감할 수 있다.
- (2) 붐의 중량감소로 붐의 각종 동작을 위한 유압장치에 요구되는 출력이 낮아지므로 저출력사양의 유압장치를 사용하여 비용을 줄일 수 있고, 기존사양을 유지하는 경우에는 유압장치의 내구성능 증대시킬 수 있다.
- (3) 측면부재의 단면적이 대폭 감소되어 작업시 강한 바람의 영향에도 측면부재가 공기저항을 덜 받으므로 신장된 사다리의 요동이 작게 되어 작업 안전성을 높일 수 있다.

참고 문헌

- (1) Kim, H. G., Kim, Y. S., Yang, S. M., Hong, D. P., Nah, S. C., Yang, G. E. and Lee, H. K., 2005, "Shape Design Optimization of the Boom System in High Ladder Vehicle," *Proc. of the 6th Int. Conf. on FEOFS*, Vol. 306, pp. 679~684.
- (2) Kohnke, F., 1995, *ANSYS User's Manual*
- (3) Thomas, Hughes J. R., 1987, *The Finite Element Method*, Prentice-Hall International Editions, pp. 90~91.