

대면적 알루미늄 후판의 수평 이송을 위한 캐리어 최적설계

전효원¹ · 윤종현[#] · 이정환¹

Optimum Design of Moving Carrier for Minimizing Deflection in Al5083 Thick Plate

H. W. Jeon, J. H. Yoon, J. H. Lee

(Received August 5, 2013 / Revised September 9, 2013 / Accepted September 16, 2013)

Abstract

One of the most efficient designs for manufacturing LNG tank is the Moss spherical type because it has been validated through precise analyses with respect to reliability and construction safety by stress analysis. The Moss spherical tank is assembled with hundreds of Al thick plate patches that are deformed to curved shape at elevated temperature and welded together. It is essential to evaluate the amount of deflection in the Al5083 thick plate when the patch is transferred from the heating chamber to the forming die since the patch has a length of 12,000 mm and a thickness of 60 mm. Based on FE analysis results, a design procedure for minimizing deflection in Al5083 thick plate during transfer using a moving carrier is demonstrated in this paper.

Key Words : LNG Tank, Moss Spherical, Al5083, Thick Plate, Deflection, FE Analysis

1. 서론

최근 고유가 및 원자력 에너지의 안전성에 대한 문제가 제기되면서 LNG 뿐만 아니라 이를 운송하기 위한 LNG 운송선의 수요가 증가하고 있다. 최근 제작되고 있는 LNG 운송선에는 기존의 Membrane 형태의 저장 탱크가 아닌 안정성 및 신뢰성이 보장되는 Moss spherical 형태의 저장 탱크가 제작되고 있다. Moss spherical 형태의 LNG 저장 탱크는 구형상으로 다수의 대면적 알루미늄 후판을 일정한 곡률로 고온에서 성형한 뒤, 이를 용접하여 제작된다 [1]. Yoon et al.[1]은 서브 사이즈의 알루미늄 후판(길이 12,000mm, 폭 8,500mm, 두께 30mm(또는 60mm))을 이용하여 온간 성형을 시도한 바 있으며, 성형 후에 발생하는 후판의 스프링백(springback) 예측 및

스프링백 저감 방법에 대하여 연구하였다. 대면적 알루미늄 후판의 온간 성형 공정을 수행하기 위하여 챔버에서 승온된 후판은 캐리어(Carrier)를 이용하여 금형 및 프레스까지 이송된다. 이 과정에서 대면적 알루미늄 후판은 자중에 의하여 많은 양의 처짐이 발생하게 되며 작업 공정의 효율성에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 대면적 알루미늄 후판의 이송 시에 발생하는 처짐량을 유한요소 해석을 이용하여 예측하였으며, 캐리어의 설계 변경 등을 통하여 처짐량을 최소화 시키고자 하였다. M. H. Imam and M. Al-Shihri[2]는 2점 이상을 지지하는 빔(Beam)에 하중을 가하였을 때 일반적인 처짐량의 절대값으로 δ^N 을 구하였다. $\delta^N = \delta / \delta^s$ 의 식으로 나타내며, δ^s 는 빔 중심의 변위를 나타내며, δ 는 빔의 끝점에서 변위를 나타낸다. 지지하는 포인트가 변화함에

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자: Korea Institute of Material Science
E-mail: jhyoon@kims.re.kr

따라 δ^N 의 값이 변화하였으며 처짐량의 편차가 가장 적은 상태를 DM(Deflection Minimization problem) 으로 설정하였다.

D. Wang [3]은 단순 지지빔에 하중이 가해졌을 때 처짐량을 확인하였다. 지지대 사이의 거리를 X, 빔의 최대 거리를 L이라고 하였을 때, X/L의 비율에 따른 처짐량 계산을 수행하였다. X/L의 비율이 0.6에서 0.8 사이에서 처짐량의 편차가 가장 낮은 것으로 확인하였으며, X/L의 값에 따라 단순 지지보의 형상이 달라지는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 ABAQUS 유한요소 해석을 이용하여 대면적 Al5083 후판의 자중에 의한 처짐량을 예측하였으며, 캐리어의 위치에 따라 알루미늄 후판의 변형거동을 분석하여 처짐량을 최소로 하는 캐리어의 최적 위치를 선정하였다.

2. 대면적 알루미늄 후판의 온간 성형

Moss spherical 방식의 LNG 저장 탱크는 일정한 곡률로 성형된 다수의 대면적 알루미늄 후판 패치(Patch)를 용접하여 구성된다. 이와 같이 제작되는 Moss spherical 방식의 저장 탱크 중, 200,000m³ 저장 탱크는 약 36m의 반경을 갖는다. 이러한 저장 탱크를 구성하기 위한 대면적 알루미늄 후판 패치의 기본 크기는 12,000mm × 8,500mm × 30mm (또는 60mm) 이므로 이를 이용하여 일정한 곡률로 냉간 성형하기 위해서는 엄청난 크기의 금형과 성형하중이 요구된다. 따라서 대면적 알루미늄 후판을 적용한 기본 패치의 곡면 성형은 400°C 정도에서 온간 성형을 수행하게 된다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 배치로 (Batch furnace)에서 승온된 알루미늄 후판은 실제 곡면 성형을 수행하기 위하여 금형으로 이송된다. 이송 중 접촉에 의한 열손실을 최소화 하며, 곡률 성형 금형에 대면적 알루미늄 후판의 취출을 용이하게 하기 위해서 빔 형태로 제작된 2개의 캐리어를 이용하게 된다. 가열된 대면적 알루미늄 후판은 자중에 의한 처짐으로 금형 및 다른 구조물에 간섭을 발생시켜 성형공정의 효율을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 유한요소 해석을 이용하여 승온된 대면적 알루미늄 후판의 자중에 의한 처짐량을 예측하고자 하였으며, 캐리어의 위치 및 거리에 따른 처짐량의 변화 양상을 분석하여 처짐량을 최소로 하는 최적 설계를 실시하였다.

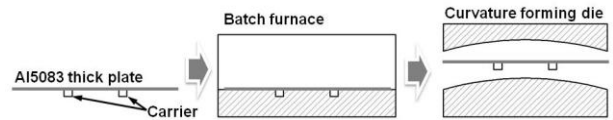


Fig. 1 Warm forming process for Al5083 thick plate

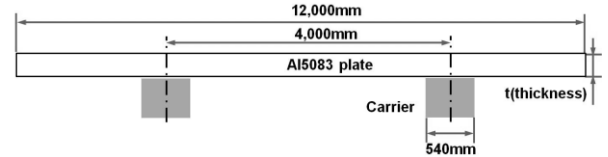


Fig. 2 Schematic diagram of carrier

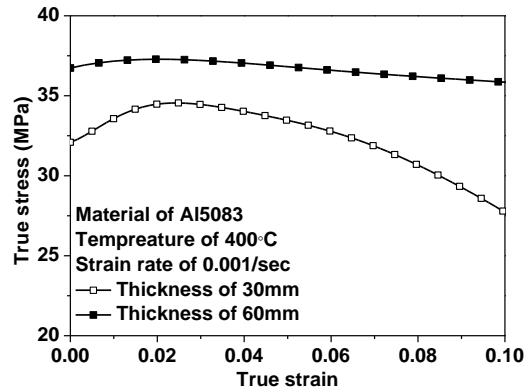


Fig. 3 True stress-strain curve for FE analysis

Table 1 Simulation condition

Simulation code	ABAQUS/Standard
Mesh type	C3D8RH
Number of mesh(ea)	50,000
Friction coefficient	0.2
Young's modulus(GPa)	70
Poisson ratio	0.33
Density(tonne/mm ³)	2.7e-09

3. 유한요소 해석

LNG 저장 탱크의 외벽은 내부식성 및 용접성, 기계적 물성, 저온 취성에 강한 Al5083이 주로 사용되고 있다. 초기 설계 상에서 2개의 캐리어 사이의 거리는 Fig. 2와 같이 대면적 알루미늄 후판의 장축 길이 12,000mm를 3등분하는 지점에 위치시켰으며, 알루미늄 후판에 비하여 상대적으로 변형이 적은 캐리어는 강체로 모델링하여 해석 효율을 높이고자 하였다.

3.1 해석 조건

대면적 알루미늄 후판의 자중에 의한 변형량을 예측하기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하였다. 유한요소 해석에 사용될 A15083 후판의 기계적 물성을 얻기 위하여 두께 30, 60mm의 시편에 대하여 고온인장 시험을 수행하였다. 준정적 인장시편은 ASTM B557-2a(Standard specimen sheet-type)에 따라 가공하였으며, 게이지 길이 50mm의 고온 익스텐소미터(Extensometer)를 이용하여 온도 조건 400°C, 변형률 속도 0.001/sec으로 고온 인장실험을 수행하였다. 고온 인장실험을 통하여 얻어진 진변형율-진응력 곡선(True strain-True stress curve)은 Fig. 3과 같다. 해석의 효율을 높이기 위하여 대면적 후판에 대하여 1/4 모델링을 수행하였으며, 3차원 브릭(brick) 요소(C3D8RH)를 사용하였다. 상세한 유한요소 해석 조건은 Table 1에 정리하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 2에서 제시된 초기 캐리어의 설계 위치에 따라 알루미늄 후판의 처짐량 해석을 수행하였다. Fig. 4와 같이 두께 30mm와 60mm에 대하여 대면적 알루미늄 후판은 중심 부에서 들림 변형이 발생하였고, 가장자리 부에서 처짐 변형이 발생하였다. 이를 정량적으로 분석하기 위하여 원점 (0, 0)을 기준으로 장축, 단축, 그리고 대각선 방향의 측정 포인트(V_k , D_j , L_i)를 선정하여 각 지점에서 변형량을 측정하였다. 이 과정에서 식 (1)에서 보는 바와 같이 절대값이 가장 큰 값을 알루미늄 후판의 최대 처짐량으로 정의하였다.

$$\delta_{\max} = \text{Max}\{|V_k|, |D_j|, |L_i|\} \quad (1)$$

V_k , D_j , L_i 방향으로의 최대 처짐량은 각각, 두께 30mm일 경우, 47.31mm, 233.47mm, 233.39mm, 두께 60mm 일 경우, 12.44mm, 61.97mm, 61.42mm가 발생하였다. 대면적 알루미늄 후판 두께 30mm의 최대 변형량은 D_j 방향에서 발생하였으며, 233.47mm의 처짐이 발생하였다. 가장 큰 처짐량이 발생하는 D_j 방향에 대하여 두께 30, 60mm의 알루미늄 후판의 변형 양상을 도시하면 Fig. 5와 같다. 위로 볼록한 형태로 알루미늄 후판이 변형하고 있는 것을 관찰할 수 있으며 후판의 중심부와 끝 단의 처짐량이 측정 부위 중에서 가장 큰 처짐량을 보이고 있다. 알루미늄 후

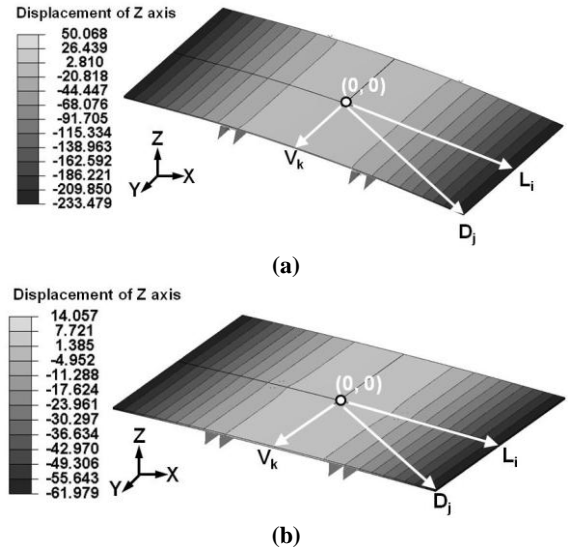


Fig. 4 Simulation result of deflection test along measurement position: (a) thickness of 30mm; (b) thickness of 60mm

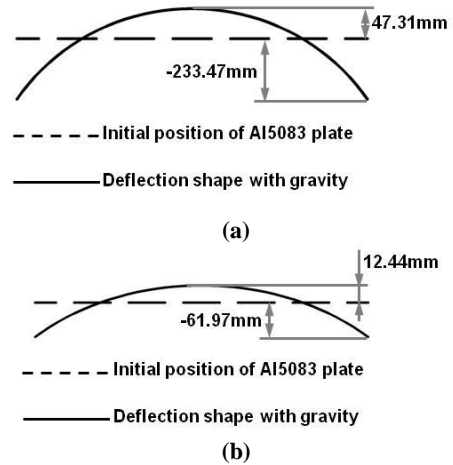


Fig. 5 Deformed shape of Al thick plate: (a) thickness of 30mm; (b) thickness of 60mm

판의 두께가 60mm일 경우, 온도 조건 400°C에서 30mm 후판과 비교하여 높은 응력선도(Fig. 3)를 보이고 있으므로 처짐량의 크기가 매우 작은 것을 알 수 있다.

3.3 캐리어 최적 설계

3.2장에서는 캐리어의 위치가 대면적 알루미늄 후판의 3등분 되는 지점에 위치하였을 때 변형 양상 및 처짐량을 해석하였다. 본 장에서는 앞선 해석결과를 바탕으로 자중에 의한 대면적 알루미늄 후판의

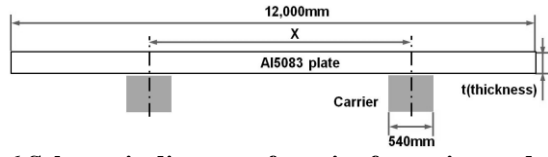


Fig. 6 Schematic diagram of carrier for optimum design

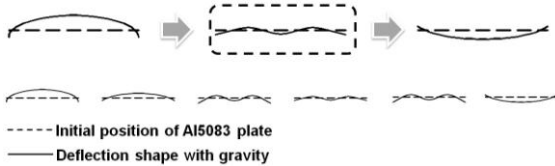


Fig. 7 Comparison of deformed shape according to carrier position

Table 2 L_C/L_A values according to carriers position

Distance between carrier(x mm)	L_C/L_A
4,600	0.38
5,800	0.48
6,200	0.51
6,600	0.55
7,000	0.58
7,400	0.61
8,400	0.7

변형량을 최소로 하는 캐리어의 최적 설계를 수행하고자 하였다. 자중에 의하여 대면적 알루미늄 후판의 변형량에 가장 큰 영향을 미치는 요소로는 Fig. 6에서 제시된 바와 같이 캐리어 사이의 거리이다. 변형량을 최소로 하는 최적 설계를 위하여 대면적 알루미늄 후판의 최대 길이(L_A)와 캐리어 사이 거리(L_C)의 비(L_C/L_A)에 따른 처짐량 해석을 수행하였다. 앞선 3.2 장에서 자중에 의한 변형량을 해석 수행 시 L_C/L_A 의 값은 약 0.38으로 과도한 처짐으로 인하여 대면적 알루미늄 후판은 위로 볼록한 돔(Dome) 형상을 보인다. L_C/L_A 의 값이 증가함에 따라 대면적 알루미늄 후판의 형상은 Fig. 7과 같이 순차적으로 돔에서 M, U 자의 형상이 나타나게 되며, 이때 처짐량이 최소가 되는 M자 형상은 L_C/L_A 값이 0.5 내외에서 나타난다[2].

알루미늄 후판의 처짐량이 최소가 되는 캐리어의 최적 위치를 찾기 위하여 L_C/L_A 값을 0.5를 기준으로 0.38에서 0.7까지 세분화 한 뒤, 각 경우에 대하여 Table 2와 같이 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 L_C/L_A 값이 증가함에 따라 각 방향의 최대

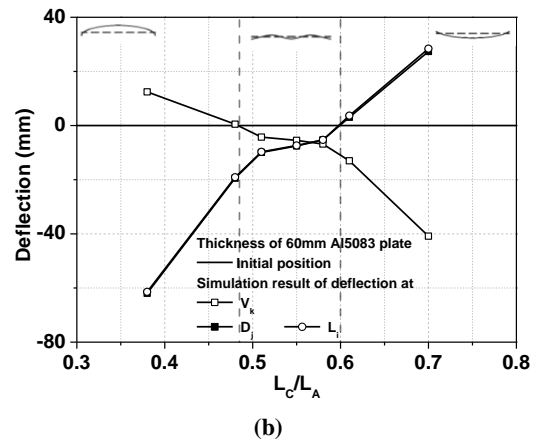
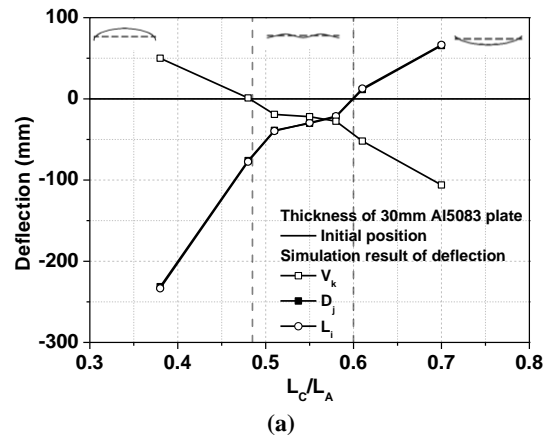


Fig. 8 Comparison of deflection according to carrier position: (a) thickness of 30mm; (b) thickness of 60mm

처짐량을 나타낸 것으로서, 대면적 알루미늄 후판의 두께 30mm와 60mm에 대하여 동일한 경향이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. L_C/L_A 값이 0.38에서 0.48까지는 가장자리 부에는 처짐이 발생하고, 중심 부에는 들림이 발생하여 대면적 알루미늄 후판은 돔 형상을 보이게 된다. L_C/L_A 값이 0.51 이후부터 0.58까지는 가장자리 및 중심 부 모두 처짐이 발생하여 M자 형상을 보이고 있다. 또한, L_C/L_A 값이 0.61이후부터 가장자리 부에 들림이 발생하고, 중심 부에 처짐이 발생하여 알루미늄 후판은 전체적으로 U자 형상을 보이게 된다.

Fig. 9는 식 (1)을 이용하여 L_C/L_A 값에 따른 최대 변형량(δ_{max})을 나타낸 것으로서, L_C/L_A 값이 0.55일 때 최대 변형량이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. L_C/L_A 값이 0.55일 때, 최대 처짐량은 대면적 알루미늄 후판의 두께가 30mm일 경우 30.15mm이며, 두께가 60mm일 경우 7.54mm으로 나타났다. Fig. 10은

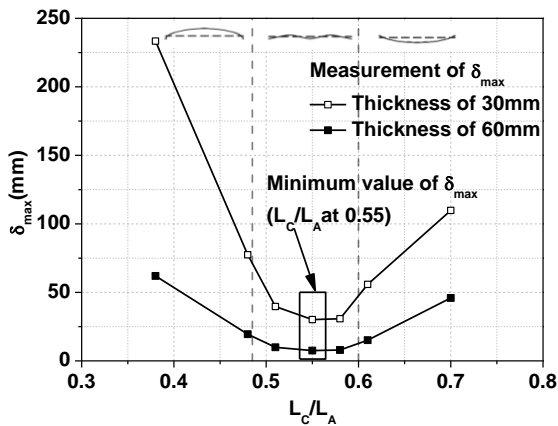


Fig. 9 Comparison of δ_{max} according to thickness

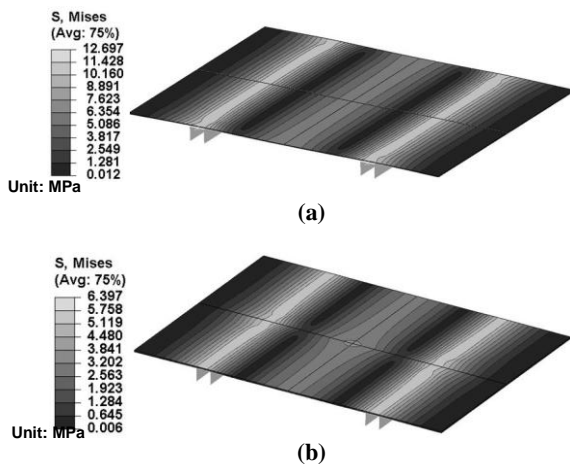


Fig.10 Simulation result of deflection test: (a) thickness of 30mm; (b) thickness of 60mm

L_C/L_A 값이 0.55일 때, 자중에 의한 알루미늄 후판의 응력분포를 나타낸 것이다. 초기 캐리어 설계 시 두께 30mm의 대면적 알루미늄 후판의 최대 응력은 23.58Mpa이며, 변형량이 최소값을 가질 때 최대 응력은 12.69Mpa로 약 47%감소하였다. 두께 60mm의 대면적 알루미늄 후판은 초기 캐리어 설계 시 최대 응력은 12.08MPa이며, 변형량이 최소값을 가질 때 최대 응력은 6.39MPa으로 약 48%감소한 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 Moss Spherical 타입 LNG 운송선의 저

장 탱크 제조 시, 대면적 알루미늄 후판의 자중에 의한 변형량을 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 또한 대면적 알루미늄 후판을 지지하는 캐리어의 위치에 따른 후판의 변형거동을 분석하여 처짐량을 최소화 하는 최적 위치를 찾고자 하였다. 유한요소를 이용한 최적 설계를 위하여 ABAQUS/Standard를 사용하였으며, 대면적 알루미늄 후판의 최대 길이와 캐리어 사이의 거리 비(L_C/L_A)에 따른 최대 변형량 (δ_{max})을 계산하여 L_C/L_A 에 따른 최대 처짐량이 최소가 되는 지점을 선정 하였다.

(1) L_C/L_A 의 값이 0.38에서 0.48까지 대면적 알루미늄 후판은 돔 형상을 보였다. L_C/L_A 값이 0.51에서 0.58까지 대면적 알루미늄 후판은 M자 형상을 보였으며, L_C/L_A 값이 0.61 이후부터 U자 형상을 보였다.

(2) L_C/L_A 값이 0.38 일 때, 자중에 의한 처짐으로 대면적 알루미늄 후판은 돔 형상을 보였으며 δ_{max} 는 대면적 알루미늄 후판 두께 30mm일 경우 233.47mm이며, 60mm일 때 61.97mm의 값이 나타났다. L_C/L_A 값이 증가함에 따라 δ_{max} 는 감소하는 경향을 보였다. δ_{max} 가 최소 값을 가질 때 대면적 알루미늄 후판 두께의 30mm의 최대 처짐량은 30.15mm이며, 60mm의 최대 처짐량은 7.54mm의 값을 보였다.

(3) 대면적 알루미늄 후판을 이용하여 캐리어 사이 거리에 따른 자중에 의한 처짐량을 도출하였다. 캐리어 사이 거리가 변화함에 따라 대면적 알루미늄 후판의 형상은 돔 및 M, U자 형상을 보였으며, M자 형상에서 변형량이 가장 적은 것으로 나타났다.

REFERENCES

[1] J. H. Yoon, H. W. Jeon, J. H. Lee, B. M. Kim, 2012, Forming Analysis of A5083 Thick plate for Moss Spherical LNG Tank and Prediction of Springback, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 5, pp. 305~311.
 [2] M. H. Imam, M. A. Shihri, 1996, Optimum Topology of Structural Supports, Comput. Struct., Vol. 61, No. 1, pp. 147~154.
 [3] D. Wang, 2004, optimization of support positions to minimize the maximal deflection of structures, Int. J. Solids Struct., Vol. 41, No. 26, pp. 7445~7458.