

LCD 로봇 주요 프레임에 대한 설계 최적화 및 용접부 수명평가[§]한성욱*[†] · 강윤식* · 김태현* · 김상현*

* 현대중공업 로봇틱스연구실

Design Optimization and Endurance Assessment of Weld Area for LCD Robot FrameSung Wook Han^{*†}, Yun Sik Kang^{*}, Teahyun Kim^{*} and Sang Hyun Kim^{*}^{*} Dept. of Robotics Research, Hyundai Heavy Ind.

(Received January 25, 2016 ; Revised September 9, 2016 ; Accepted October 7, 2016)

Key Words: Topology Optimization(위상최적화), Flexible Body(유연체 탄성모델), Hot Spot Stress(핫스팟응력)

초록: 제품을 개발하는데 있어서 경량화와 원가절감이라는 두가지 요소는 가장 중요한 화두이다. 특히 대형 LCD 로봇은 최대 3×3m 이상의 글라스를 7m 높이까지 상하, 전후로의 직선운동과 선회축을 중심으로 한 회전운동을 하면서 작업공정간 이송을 가능케 하는 대형 구조물이다. 따라서 지나치게 무거운 경우에는 클린룸내 설치에 문제가 있을 수 있고 반송물의 정확한 이송을 위하여는 고강성이 요구되며 대량 생산을 위한 연속작업을 충분히 감당할 수 있는 내구강도를 확보하여야 한다. 따라서 경량화, 고강성, 고강도 제품에 대한 요구는 갈수록 증가하고 있다. 현재 개발되고 있는 11 세대 대형 LCD 승강프레임은 이러한 요구조건을 충족하기 위하여 최적설계 기법을 적용하여 기존 제품 대비 경량화와 고강성 요구조건을 만족하였으며 용접부에 대한 상세 수명평가로 내구강도에 대한 신뢰성을 확보하였다.

Abstract: LCD robot vertical frame lets a arm assembly with glass substrate move up and down, so it must have high stiffness and strength. We applied new manufacturing process by using design optimization process such as topology and size optimization in order to satisfy the request of high stiffness and light weight. The proposed model should be evaluated for endurance strength. Therefore fatigue assessment for weak point of aluminum welding area of vertical frame studied with hot spot stress approach. And the actual stress measuring from test was compared and evaluated with the dynamic stress calculated from multi-body dynamics considering flexible body.

1. 서 론

생산성 향상을 통한 원가 절감의 목적으로 반도체 및 전자산업 업체에서의 대형 LCD 박판개발에 대한 수요는 나날이 늘고 있다. LCD 를 생산하는 공정은 모두 클린룸에서 이루어지며 이러한 공장은 특수한 구조의 형태이므로 로봇에 대한 고강도와 고강성이 요구된다. 또한 설치의 난해함에 따라 경량화에 대한 요구가 고객으로부터 끊이지 않고 있다. 현재 당사에서는 11 세대 글라스(3320×3000mm)를 이송할 수 있는 로봇을 개발하였으며 이에 대한 성능평가가 이루어지고 있다. 대형 글라스를 이송하기 위하여는 반송물을 높은 곳까지 이송하여야 하기 때문에 기존 로봇에 비하여 훨씬 긴 승강 스트로크를 구현할 수 있는 대형 승강프레임의 역할이 매우 중요하다. 승강프레임의 길이가 7m 에 달하기 때문에 고강성을 유지하여야 하며 고속 작업성과 설치가 원활하기 위하여 프레임이 무겁지 않아야 한다. 기존의 승강프

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회(2015. 11. 10-14., ICC 제주) 발표내용을 토대로 한 논문임.

† Corresponding Author, wook@hhi.co.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

레이밍은 대부분 제작형상의 복잡성과 가공의 높은 난이도로 인하여 주로 알루미늄 주물재를 이용한 사형 혹은 목형 주조공법으로 제작되었다. 하지만 갈수록 높아지는 제품 경량화에 대한 고객의 요구증대와 제작 및 가공기술의 발전으로 제조 방법의 다양화가 이루어졌으며, 특히 CAE의 발전으로 인하여 경량화를 위한 많은 시도들이 가능하여졌다. 본 연구에서는 알루미늄 압출과 용접을 이용한다. 기존 공법 대비하여 강성의 저하 없는 경량화 모델을 제안하고 이에 대한 초기 설계단계부터 제품 시험까지의 전 과정에 대한 검증은 진행하였다.

2. 설계 최적화

2.1 위상 최적화

압출 공법을 이용한 승강 프레임의 단면형상 구현에는 위상 최적화(Topology)를 적용하였고 구현된 단면의 두께 최적화를 위하여는 치수 최적화(Size Optimization)기법을 상용 최적설계 프로그램인 Hyperworks의 Optistruct⁽¹⁾를 이용하여 도출하였다. 압출 프레임은 시작부분부터 끝부분까지 단면 형상의 변화가 없으며 외벽과 가운데 리브의 두께에 대한 설계 자유도가 높기 때문에 제품변형을 줄이기 위한 최적 단면을 구하는 것이 매우 중요하다. 따라서 압출공정을 염두에 두고 내부 설계영역의 위상 변화에 대한 방향성(Draw direction vector)을 부여하고 최적화 문제를 정의하기로 한다.

$$\text{Minimize } C = W_1C_1 + W_2C_2 + W_3C_3$$

$$\text{Constraint to Design Domain Mass} \leq 0.2 M_0$$

C: Compliance

W: Weighted factor, $W_1=W_2=W_3=0.33$

M_0 : Initial mass of Design Domain

이는 제한된 질량 내에서 구조물의 변형을 크게 유발하는 하중에 대하여 동일한 가중치를 적용하여 컴플라이언스를 최소화하는 것을 목적함수로 하여 최적의 형상을 구하도록 하는 것이다. 구조물의 변형을 최소화하는 것이 로봇 성능 측면에서 가장 중요한 요소이므로 컴플라이언스 최소화를 목적 함수로 하였다. 물론 강도적인 측면을 고려하여야 하지만 응력 집중부위가 예상가능하고 국부적인 응력집중 형태를 가지는 경우에는 어느 정도 초기 설계안을 가지고 상세 설계단계에서 응력을 저감시키는 방향으로의 설계 변경을 가지고 가는 것이 효과적이다.

Fig. 1은 초기 설계영역에서 위상최적화 과정을 통하여 최적의 Rib 형상을 도출하고 이를 반영하여 초기 설계된 압출품 단면 형상에 대하여 모든 플레이트에 대한 두께 최적화를 진행하여 최적화된 설계안을 도출하는 과정을 보여준다. 이러한 과정으로 제안된 최적 설계모델에 대한 검증을 통하여 개선된 모델은 초기 설계안 대비 중량의 증가 없이 28%의 강성 증대 효과를 가져왔다.

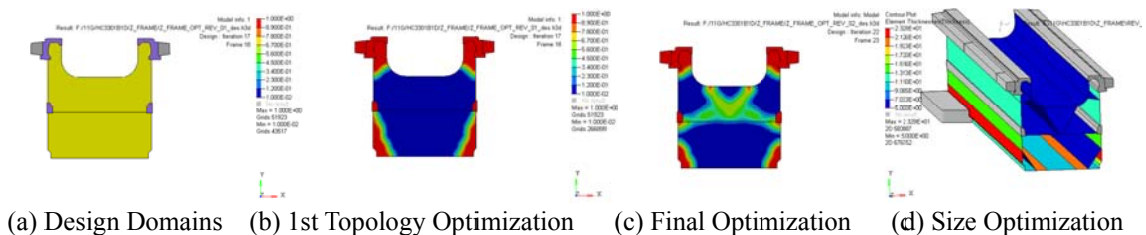


Fig. 1 Topology and size optimization process

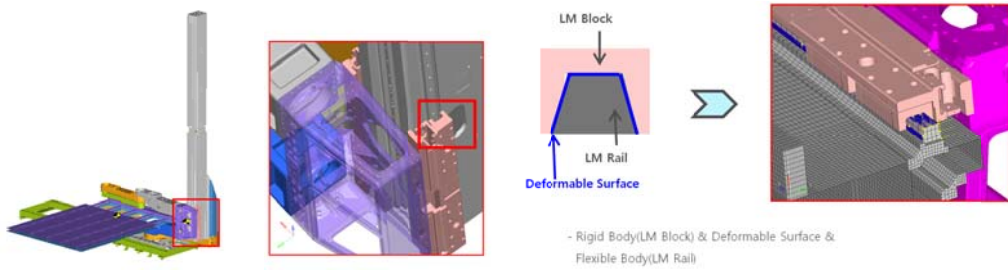


Fig. 2 Dynamic model with flexible body of vertical frame and considering contact conditions between LM-Rail and blocks

3. 구조안정성 평가

3.1 유연체 동역학 해석

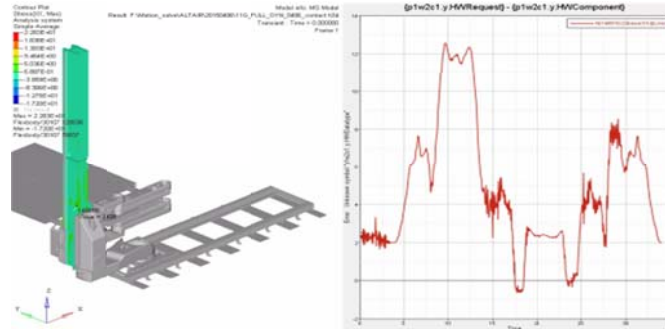
일반적으로 내구평가를 하고자 하는 구조물의 하중 이력을 구하는 경우에는 단위하중에 대한 응력해석결과와 하중 이력을 곱하여 얻어진 응력프로파일에 대하여 Miner's Rule 을 이용한 피로손상을 계산하여 내구수명을 구하는 것이 일반적이다. 하지만 본 승강프레임과 같이 반송물을 상승 하강 시킴에 따라 승강프레임에 작용하는 하중점의 위치가 연속적으로 변하는 경우에는 작용하중에 대한 모멘트 암의 길이 역시 연속적으로 변하기 때문에 하중 입력점이 고정되어 있는 기존의 방법으로는 피로 평가하고자 하는 부위의 응력프로파일을 정확히 도출하기가 어렵다. 물론 간단하고 비교적 짧은 시간의 하중이력을 이용하는 해석의 경우에는 승강프레임과 하중 부하부간 접촉조건을 설정하고 이를 과도응답해석(Time Transient)를 통하여 구할 수도 있겠다. 그러나 승강프레임과 같은 대형구조물을 30 초 이상의 시간에 대하여 해석하는 경우에는 시간영역에서 시간 증분에 대한 하중변화와 하중부하 지지점과 승강프레임간 접촉면 변화 등을 고려하여 해를 계산하는 것은 매우 오랜 시간이 소요되며 효율적이지 않으므로 사용이 어렵다. 따라서 앞서 하중이력을 구하기 위하여 만들었던 동역학모델에 내구 평가하고자 하는 승강프레임을 유연체 모델로 변환하였으며 작업 시 연속적으로 변하는 하중입력 위치를 고려하기 위하여는 하중입력 부재와 승강프레임간 접촉조건을 구현하여 Fig. 2 와 같은 동역학 모델을 구성하였다.

본 연구에서는 상용 프로그램인 Motion Solve 를 이용하여 Craig-Bampton 방법에 의한 모드합성법을 적용하여 탄성체의 거동을 구현하였다.⁽²⁾ 유한요소모델의 경계절점은 타 부재와의 연결 조인트나 하중이 가해지는 요소를 연결하는 데 사용된다. 그리고 동역학 모델이 동작시 각 모드별 응력에 각 모드의 모달 변위를 곱하여 임의의 시간에 대하여 선형적으로 더하여 응력을 계산하게 되며 아래의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i q_i(t) \quad (1)$$

이와 같이 구속모드와 자유모드를 포함하는 모달응력과 각 모드의 모달변위를 곱하고 이를 선형적으로 합산하여 구조물에 작용하는 응력을 계산하는 것을 모달응력 회복법(Modal Stress Recovery)이라 하며 구조물의 동적 거동에 따른 응력상승을 고려할 수 있다라는 장점이 있다.

그런데 본 모델에서는 승강프레임에 가해지는 하중의 위치가 Arm Base 에 취부된 LM Block 이 LM Rail 면을 따라 상하로 슬라이딩하면서 움직임에 따라 단순히 경계절점에 하중을 입력하게 되면 실제 거동을 구현할 수 없다. 강체 모델인 LM Block 과 유연체 모델인 승강프레임간에는 직접적인 하중을 전달하는 경로가 없다. 따라서 LM Blocks 슬라이딩면에 종속되는 Points 를 생성하고 유연체 모델의 LM Rail 면에 종속되는 Deformable Surface 를 생성하여 Motion View 프로그램에서 제공하는 Point to Surface Contact 방법으로 시간에 따른 하중 부하위치 변화를 구현할 수 있었다. 아래 Fig. 3(a)는 승강프레임에 작용하는 응



(a) Dynamic stress distribution (b) Dynamic stress profile at weak point

Fig. 3 Stress results of vertical frame considering flexible body effect

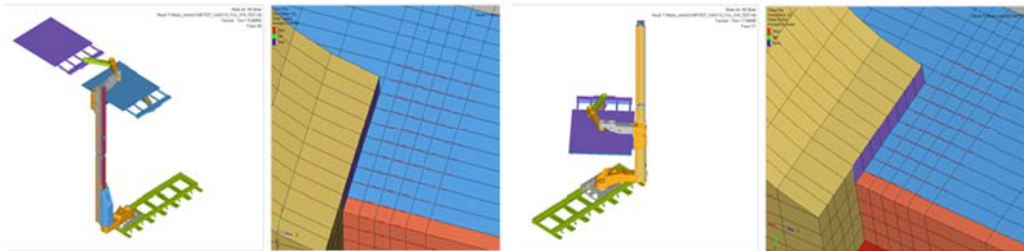
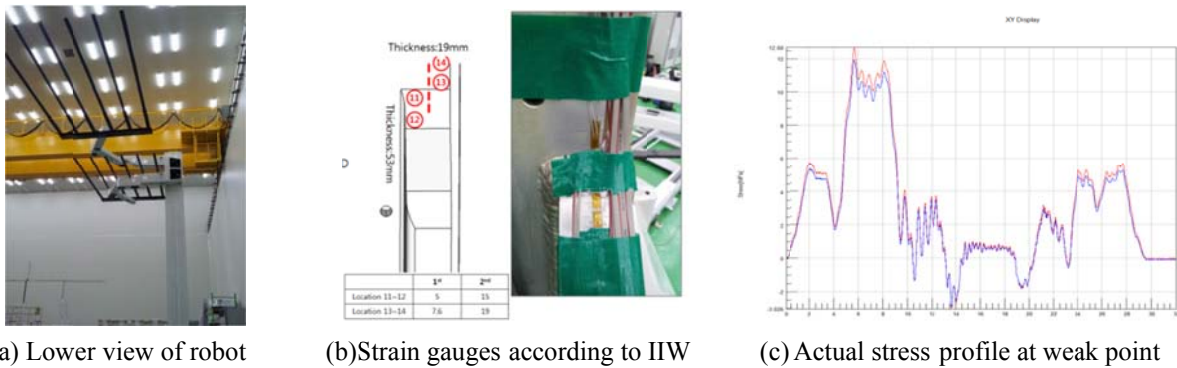


Fig. 4 Principal stress tensor direction for several motions



(a) Lower view of robot

(b) Strain gauges according to IIW

(c) Actual stress profile at weak point

Fig. 5 Test measuring actual stress at weak point

력분포를 보여준다. 승강프레임을 고정하는 플레이트의 끝단 용접부에서 가장 큰 응력을 보이며 weak point에서의 동적 응력프로파일을 보여준다. Weak point에서의 주응력 방향은 Fig. 4에서와 같이 로봇 동작에 관계없이 승강축 길이 방향, 즉 용접 비드에 직각으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 동응력 측정시 스트레인게이지의 방향을 결정하게 되며 단방향에 대한 응력 측정으로 수명평가가 가능하다는 것을 보여준다.

3.3 동응력 시험

구조해석 결과로부터 가장 취약부인 하단 고정 플레이트와 압출 프레임간 용접부의 실동응력 측정을 위하여 시제작된 로봇 승강프레임에 스트레인게이지를 취부하였다. 동하중 추출을 위하여 사용하였던 속도 프로파일과 동일한 값을 구동축에 입력하여 로봇을 동작시키면서 실시간으로 실동응력을 측정하였다.

Fig. 5 를 통하여 최대응력은 고승강시 상부 암을 최대 스트로크로 뺐었을 때 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5(a)와 같이 암축 질량이 승강축을 중심으로 가장 멀리 위치할 때 즉, 무게 중심 이동에 따

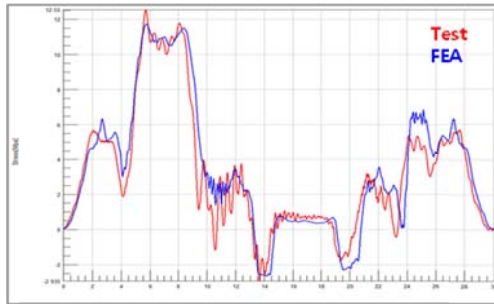


Fig. 6 Stress profile comparison between results of test and FE Analysis

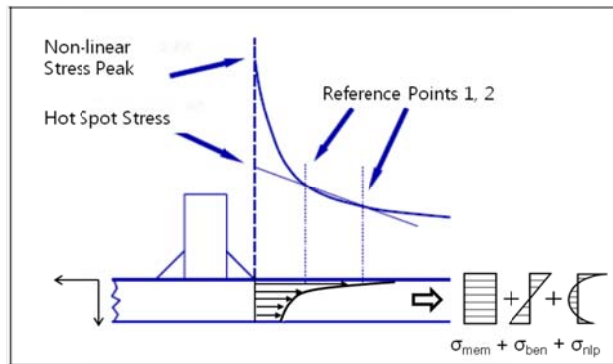


Fig. 7 Definition of hot spot stress and stress components

른 모멘트 암의 길이가 가장 길어졌기 때문으로 주행축(X-dir)에 대한 회전 모멘트가 최대인 경우이다. 앞서 해석에서 구하였던 동응력과 매우 유사한 응력 프로파일 형태를 지남에 따라 이를 동응력 측정시 스트레인게이지를 통하여 얻은 응력결과와 아래 Fig. 6에 같이 비교해보았다. 승강축에는 압출프레임 이외 전체 중량의 1/3 정도에 해당하는 다양한 기계 요소품들이 장착된다. 물론 이러한 요소품들을 모두 유한요소 모델로 구현하면 좀 더 시험과 유사한 시험결과를 얻을 수 있겠으나 본 연구에서 제안한 해석 모델로도 동일한 시간영역상에서 시험과 해석에서 각각 구하여진 응력프로파일들이 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 승강프레임에 대한 해석 모델의 구성과 해석적 접근 방법이 매우 타당하였다는 것이다.

4. 피로평가

일반적으로 BS7608 이나 Eurocode9 를 포함한 각종 강도 규격 코드들은 용접부재의 연결 구조와 작용 하중의 형태에 따라 피로강도에 대한 등급을 나누고 각각의 등급에 따라 설계기준이 되는 내구선도를 제공하고 있다. 이러한 용접부의 내구선도는 공칭응력을 기준으로 산출된 것이므로 용접부에 발생한 응력분포도에서 어떤 값을 사용할 것인지에 대한 정의가 충분히 되어 있지 않다. 그리고 복잡한 구조물의 기하학적 형상을 모두 반영하고 있지 못하므로 새로운 용접부 수명평가 방법의 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 측정된 응력 프로파일을 IIW(International Institute of Welding)⁽³⁾에서 제안하는 Hot Spot Stress 계산 및 평가방법을 이용하여 검토하였다.

용접부 피로평가를 위한 Hot Spot Stress 는 구조물의 기하학적 형상과 하중 flow 에 따른 응력집중효과는 고려하지만 모재와 용접 비드간의 형상적 불연속성에 따라 발생하는 Notch 효과에 의한 비선형 특성은 고려하지 않는다. 용접부에서 판 두께 방향으로의 응력 구배는 위 Fig. 7 과 같이 구조물의 기하학적

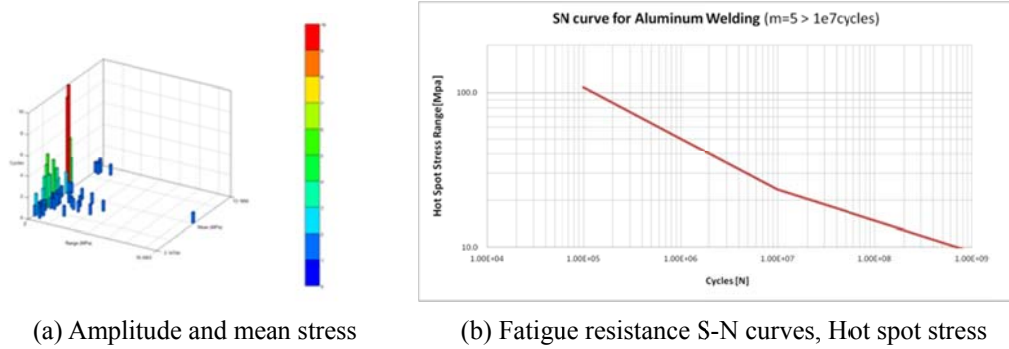


Fig. 8 Histogram of fatigue stress and S-N curves (Hot spot stress vs. Cycle)

형상에 따른 선형 성분과 용접비드의 노치 효과에 따른 비선형 성분으로 나누어질 수 있는데 이렇게 두께 방향으로 변하는 응력 성분을 아래의 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{mem} = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \quad (2)$$

$$\sigma_{ben} = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \quad (3)$$

$$\sigma_{nlp}(x) = \sigma(x) - \sigma_{mem} - \left(1 - \frac{x}{2}\right) \cdot \sigma_{ben} \quad (4)$$

여기서 Hot Spot Stress 를 구하기 위한 구조응력(Structural Stress, σ_{ss})은 두께 방향으로의 평균응력(σ_{mem})과 굽힘응력(σ_{ben})의 합으로 나타낼 수 있으며 이를 이용한 Hot Spot Stress 계산방법은 Fig. 7 에서의 Reference 1, 2 points 에서의 구조 응력을 먼저 산출하고 이를 선형 외삽하여 계산하게 되는데 아래의 수식 (5)를 이용한다.

$$\sigma_{hs} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0t} \quad (5)$$

앞의 Fig. 4(b)에서 부착하였던 스트레인게이지 위치 역시 식 (4)와 Fig. 8 에 맞추어 계산된 Reference points 에 부착된 것이다. Fig. 9 는 위의 식 (5)에 따라 계산된 Hot Spot Stress 프로파일을 이용하여 계산된 Amplitude Stress 와 Hot Spot Stress vs. 수명 선도(SN-curve)를 보여주며 구해진 응력프로파일과 식 (6)의 Miner's Rule 과 로봇 작업시간 등을 고려하여 수명으로 계산된다.

$$\sum_{i=0}^k \frac{n_i}{N_i} = \text{Damage} \quad (6)$$

n_i : Contributing Cycles

N_i : The number of cycles to failure

기존 BS code 와 달리 SN-curve 가 구조물의 기하학적 형상과 용접 방식에 따라 복잡하게 구분되지 않고 하나의 curve 로 정의되어 있다. Fig. 8(a)의 Histogram 은 로봇 작업 1 공정(30 seconds) 동안 발생한 피로응력분석결과이며 Miner's Rule 과 Fig. 8(b)의 S-N 선도를 이용하여 구한 피로수명은 로봇 사용 연한을 크게 넘어서므로 제안된 승강프레임의 용접부는 충분한 내구강도를 가지고 있음을 본 연구를 통하여 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 산업용로봇의 승강축을 최적설계 기법을 적용하여 고강성 경량화된 설계안을 제안하였

고 상대적으로 취약하게 나타난 용접부에 대한 상세 강도해석을 통하여 충분한 내구강도를 가진다는 것을 확인하였다. 또한 동응력 측정 시험과 해석결과와의 상호 비교를 통하여 해석적 강도 검토 방법과 모델 구성에 대한 신뢰성을 확보 하였다.

(1) 로봇 승강프레임에 대한 고강성 경량화를 위하여 위상 및 두께 최적화를 적용한 최적 설계안을 제안하였고 그 결과 구조강성의 저하 없이 20%의 경량화를 달성할 수 있었다. 승강 압출프레임 중심영역 Design Domain 에 대한 위상 최적화를 통하여 고강성 Rib 형상을 구하였고 프레임 외곽 및 Rib 두께는 치수최적화(Size Optimization)을 통하여 경량화가 가능한 플레이트별 최적 두께분포를 얻을 수 있었다.

(2) 로봇 시스템에 대한 동역학 모델을 구성하고 강도를 평가하고자 하는 승강프레임을 유연체 모델로 구성하여 로봇 작동시 승강프레임에 작용하는 응력분포와 발생하는 응력 프로파일을 시간영역에서 구할 수 있었다. 최대응력은 고정플레이트와 압출프레임간 용접부에서 발생하였고 나머지 부위는 충분히 낮은 수준의 응력분포를 나타냄을 알 수 있었다. 상대적으로 취약한 고정플레이트와 승강프레임간 용접부는 Hot Spot Stress Approach 를 통하여 로봇 작업동작에 대한 충분한 내구수명을 확보하고 있음을 확인하였다.

(3) 로봇 동작시 승강프레임에 가해지는 하중의 부하위치는 연속적으로 변화한다. 이러한 하중위치 변화는 승강프레임에 가해지는 하중에 대한 모멘트 암의 길이 변화를 가져오기 때문에 강도 검토 해석 시 반드시 고려하여야 하는 부분이다. 이를 해결하기 위하여 하중을 가하는 매개체인 강체와 유연체 모델간 슬라이딩 조건을 구현하기 위하여 접촉조건을 고려한 유연체 동역학모델을 구성하였다. 이를 통하여 원하는 부위에서의 동적 응력프로파일을 손쉽게 구할 수 있게 되었고 이는 실동응력 측정 시험을 통한 응력프로파일 결과와 매우 일치함을 알 수 있었다. 따라서 향후 로봇 구조물의 강도평가에 적극 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

- (1) Altair Hyper Works, 2011, "Optistruct Optimization," Altair Engineering Inc.
- (2) Ko, J. B. Lim, Y. H. and Lee, D. C., 2010, "Analysis of Durability of Torsion Beam Axle Using Modal Stress Recovery Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, pp.1339~1344.
- (3) Hobbacher A., 2006, "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components," *International Institute of Welding*, doc. XIII-1965r14-03/XV-1127r14-03, pp. 21~22, 30~33.