개폐에 따른 지게차 포크의 내구성에 대한 구조해석

조재웅*, 한문식⁺

(Manuscript received: Aug, 30, 2012 / Revised: Dec, 21, 2012 / Accepted: Dec, 21, 2012)

Structural Analysis on Durability of Forklift due to Opening and Closing Between Forks

Jaeung Cho*, Moonsik Han⁺

Abstract

Stress and deformation on forklift happened at loading, unloading or moving freight are studied by structural and fatigue analysis in this study. As model 1 as closing type between forks has lower stress and stain than model 2 at opening type, model 1 has more durability than model 2. Among the cases of nonuniform fatigue loads, 'SAE bracket history' with the severest change of load becomes most unstable but 'Sample history' becomes most stable. In case of 'SAE bracket history' with the severest change of load at model 1 and 2, maximum life is shown with Cycle. Minimum damage with 854 at model 2 becomes much higher than model 1. As the gap between forks becomes open, the damage probability becomes higher. The structural result of this study can be effectively utilized with the safe and stable design of forklift by investigating prevention and durability against its damage.

Key Words : Forklift(지게차포크), Fork(포크), Nonuniform fatigue loads(불규칙 피로 하중들), Fatigue life(피로수명), Fatigue damage (피로 손상), Durability(내구성)

1. 서 론

지게차란 포크, 램 등 화물을 적재하는 장치 및 이것을 승강시키는 마스트를 구비한 하역 자동차를 말한다. 화물을 운반할 때, 짐을 2m 정도 높이까지 상·하차를 할 수 있는 기계이다. 지게차 포크 장치 모듈 전체를 해석하여 접근하는 것은 여러 가지의 실제적인 인자를 고려하여 해석을 해야 하기 때문에 해석에 있어서 실제 상황에 근접하기가 어렵다. 본 연구에서는 지게차의 많은 장치 중에서 가장 구조적으로 하중에 의하여 영향을 받는 지게차 포크 부분에 대하여 구조 및 피로해석^(1~4)을

하였다. 우선 지게차 포크에 기름이 가득 찬 드럼통이 적재되었다고 가정하여 포크 중앙에 압력을 주어 지게차 포크가 열리고 닫힐 때에 지게차 포크가 받는 응력과 변형을 측정하였다. 또한 피로해석을 통하여 포크의 열리고닫힘에 따라 수명과 포크에 미치는 손상을 비교 확인하였다. 그 결과로서 포크의 열리고 닫힘에 따라 피로를 받는 지게차 포크 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고, 포크의 닫히고 열림에 따른 피로 수명의 영향을 해석 할 수 있었다^(5~7). 이러한 본 연구 결과를 종합하여 지게차의 포크를 설계할 때 응용한다면, 지게차 포크에 화물을 상·하차 할 때 또는 이동할 때 지게차 포크가 닫혀있

* 공주대학교 기계자동차공학부

+ 교신저자, 계명대학교 기계자동차공학과

주소: 704-701 대구시 달서구 달구벌대로 2800

✉ Corresponding Author E-mail: sheffhan@kmu.ac.kr

거나 완전히 벌어져 있을 경우에 발생하는 구조적 변형 및 피로 파손을 방지함으로써 그 내구성을 예측하는 데에 활용이 클 것으로 사료된다. 특히 물건을 적재한 포크 부분은 적재된 물건이 떨어지거나 손상되는 사고가 났을 경우에 그 안전사고에 대한 위험성이 많이 있다. 즉 작업시에 있어서 지게차 포크를 벌리고 닫힐 경우에, 그 포크의 내구성 및 안전성이 특히 강조가 됨으로서 이에 대한 설계 검증이 반드시 필요하다고 보인다. 또한 기존 연구의 해석 방법으로는 많은 부품의 접촉으로 인하여 해석 시간이 많이 걸리고 그러한 경우에 해석을 하였다고 하더라도 실제치에 수렴하여 접근하기가 어려웠다. 본 해석 방법으로는 많은 부품의 접촉을 상세히 묘사하다기 보다는 그러한 접촉을 단순하게 하여 전체적인 모델에 대하여 해석을 하여 그 내구성 및 안전성을 전반적으로 검토하였다. 또한 실제적으로 현장에서 그 해석 결과를 사용할 수 있도록 분석 및 검토가 용이하다고 사료된다.

2. 연구 모델 및 해석 결과

2.1 연구 모델

본 연구 모델은 Fig. 1과 같이 포크가 닫히고 열리는 두 가지 형상에 대하여 ANSYS로 비교 해석하였다⁽⁸⁾. 실제 치수로서는 포크를 고정하는 포크대는 가로 및 세로가 각각 2000mm 및 세로 1000mm이다. 또한 포크의 길이는 1800mm, 너비는 100mm이지만 해석상 비율을 1/10로 축소하여 설계하였다. 이는 실제 실물 크기가 커서 메시 및 절점의 개수가 많이 늘어나 해석시간이 길어짐을 효율적으로 줄일 수 있다. Fig. 2는 지게차 포크가 닫힌 형상에서의 Mesh모양이다. 모델의 절점수는 6816개이며 요소수는 2725개이다.

Fig. 1 Forklift model configurations

포크가 닫히고 열리는 두 가지 형상에 대한 Model 1 및 2의 경계조건들로서는 Fig. 3에서 A와 같이 지게차 포크를 고정하고 있는 포크대 부분을 고정하여 지지하고, B와 C부분에 두 방향으로 실제 포크에 작용될 수 있는 하중을 가하였다. B부분에는 기름이 가득 찬 드럼통이 200kg이 있다고 가정하였지만 처음에 포크 설계 시 치수를 1/10로 축소하여 설계하였으므로 하중도 또한 1/10로 축소하여 20kg의 하중을 가하였다. C부분에는 드럼통이 살짝 걸치는 지지대로 사용하여 2N의 하중이 작용하는 것으로 가정하여 압력을 계산하면 다음과 같다. C지지대 부분의 면적은,

$$0.1(m) \times 0.01(m) = 0.001(m^2) \text{이다. 따라서 압력}$$

$$P = 2(N) / 0.001(m^2) = 2000(Pa) = 0.002MPa \quad (1)$$

Fig. 2 Mesh of forklift model

Fig. 3 Constraint conditions of Forklift models

값으로 압력을 가하였다.

그리고 B부분에 작용하는 압력은 다음과 같이 가정하였다.
20kg의 하중은 무게로 계산하면, 다음과 같다.

$$F = m \times g = 20 \times 9.81 = 196.2(N) \quad (2)$$

그리고 수직방향의 힘을 받는 B지지대의 면적은 $0.18(m) \times 0.1(m) = 0.018(m^2)$ 이다. 따라서 B 지지대의 면적은 다음과 같다.

$$P(Pa) = \frac{F(N)}{A(m^2)} = \frac{196.2}{0.018} = 10889(Pa) \quad (3)$$

$$= 0.010889(MPa)$$

Table 1 Material property

Parameter	Values
Young's Modulus	$2 \times 10^5 MPa$
Poisson's Ratio	0.3
Density	$7850 kg/m^3$
Tensile Yield Strength	250MPa
Compressive Yield Strength	250MPa
Tensile Ultimate Strength	460MPa

Table 1은 이 모델링의 구조용 강으로서의 물성치를 나타낸 것이다⁽⁸⁾.

2.2 해석 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 포크가 닫히고 열리는 두 가지 형상에 대한 Model에 대하여 지게차 포크가 받는 응력과 전변형량을 나타낸 그림이다. Fig. 4의 (a)는 포크가 서로 모여져 닫혀 있을 때 측정된 응력 값이며 (b)는 이 때 변형량을 나타낸 값이다. Fig. 5의 (a)는 포크가 열려 끝자리에 위치할 때 측정된 응력 값이며 (b)는 이 때 변형량을 나타내었다. 그림들에서와 같이 우선 응력 값의 결과를 살펴보면 Model 2의 포크 형상이 Model 1에 비하여 더 큰 $4.2257 \times 10^8 Pa$ 의 최대응력이 됨을 확인할 수 있다. 포크가 닫혀 있는 Fig. 4(a)에 비하여 포크가 열려 있는 Fig. 5(a) 형상이 더 높은 수치의 응력 범위 색들이 나타난다. 또한 전변형량을 살펴보면 포크가 열려 있는 Model 2는 34.706mm의 최대 변형량 값에 비하여 포크가 닫혀 있는 Model 1의 (b)에서는 변형량 값 3.1062mm로서 훨씬 더 작은 변형이 나타난 것을 확인하였다. 포크가 모여져 있는 Model 1의 형상이 포크가 벌어져 있는 Model 2형상보다 응력 값과 변형량 값이 훨씬 더 작게 나타나 내구성면에서 더 안전하다는 것을 확인하였다.

피로에 대한 해석 결과의 출력들⁽⁸⁾은 피로 수명 및 파손들이

(a) Contour of equivalent stress

(b) Contour of total deformation

Fig. 4 Structural analysis of forklift model 1

(a) Contour of equivalent stress

(b) Contour of total deformation

Fig. 5 Structural analysis of forklift model 2

Fig. 6 Fatigue load history

다. 각각의 출력들은 불규칙 진폭하중들이인 Fig. 6과 같이 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’, ‘Sample History’들의 3종류의 피로 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 본 연구에서는 이와 유사한 작업 환경으로서 피로 하중 상태를 인용하였다. 따라서 인용된 하중 데이터로, 바위 등 산간지역에서의 극심한 환경에서 작업할 수 있는 피로 하중 유형으로서의 ‘SAE bracket history’를 택하였고 좀 덜 험한 지형인 뜰이나 밭고랑 등 평지에서의 작업 환경으로 ‘SAE transmission’을 선택하였다. 그리고 하중 상태가 비교적 일반 도로 등 매우 완만한 작업 조건에서의 ‘Sample history’를 택하였다. 또한 피로 사이클 하중으로서 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수가 있는데, 3가지의 평균 하중에 대하여 배율을 적용하여 진폭하중을 적용하였다.

무한수면 설계영역을 나타내는 실험적인 관계식으로서 교변 응력축상의 피로한도는 평균응력축상의 응력진폭(σ_a), 평균응력(σ_m), 피로한도(S_e) 및 진파괴응력(σ_f)과 관계되어 있다. 본 연구에 사용된 피로 해석의 그 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (5)$$

여기서, $\sigma_{\max}$: 최대응력, $\sigma_{\min}$: 최소응력이다.

Fig. 7은 포크가 닫혀 있는 Model 1에 대하여 사용 가능 수

Fig. 7 Fatigue life at forklift model 1

명에 대한 등고선 그림이다. 이 결과는 Model 전체에 걸쳐 계산 될 수 있는데 불규칙 진폭 하중으로 본 Model에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다. 그림을 보면 (a)의 경우 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 3.3693×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 확인 할 수 있고, 하중의 변화가 가장 완만한 ‘Sample History’의 경우가 수명이 2×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것으로 나타나며 두 개의 포크 부분에서 수명이 짧아짐을 알 수 있었다.

Fig. 8은 역시 포크가 닫혀 있는 Model 1에 대한 것으로, 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나눈 것으로 정의 된다. 최저 손상으로 3가지 경우들을 비교할 수 있는데 Fig. 8에서 보면 (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가

(a) SAE Bracket History

(b) SAE Transmission

(c) Sample History

Fig. 8 Fatigue damage at forklift model 1

(a) SAE Bracket History

(b) SAE Transmission

(c) Sample History

Fig. 9 Fatigue life at forklift model 2

최저손상이 0.1484로 가장 많은 것을 확인할 수 있고, 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우는 그 손상이 0.0025로 가장 적은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket History’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있으며, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

Fig. 9는 포크가 열려 있는 Model 2에 대한 것으로, 사용 가능 수명에 대한 그림이다. 그림을 보면 (a)의 경우는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우로 사용 가능 수명이 3.3693×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 확인할 수 있고, 하중의 변화가 가장 완만한 ‘Sample History’의 경우가 수명이 2×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것으로 수명은 Model 1과 Model 2는 공히 두 개의 포크 부분에서 수명이 짧아짐을 알

수 있었다.

Fig. 10은 역시 포크가 열려 있는 Model 2에 대한 것으로, 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상이다. 포크가 닫혀 있고 열려 있는 상태에서의 Model 1과 2를 비교하면, (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 최저 손상이 Model 1은 0.1484이고 Model 2는 854로 상당히 높은 값을 나타냈다. 또한 하중의 변화가 완만한 (c)의 경우인 ‘Sample History’의 경우에서도 그 수명이 Model 1은 0.0025이고 Model 2는 50으로 더 높은 값을 보였다. 따라서 포크의 위치가 모여진 Model 1보다 그 포크가 완전히 벌어져 있는 Model 2가 더 높은 손상의 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 결과적으로 지게차 포크가 닫혀있거나 완전히 벌어져 있을 때의 그 손상의 정도를 비교하여 확인할 수 있었다. 그리고 지게차 두 개의 포크 사이의 거리가 가까워서 닫혀 있는

Fig. 10 Fatigue damage at forklift model 2

경우가 포크 사이의 거리가 먼 경우의 열려 있는 경우 보다 구조 및 피로 해석에서 더 우세한 결과 값을 도출할 수 있었다. 따라서 화물을 상·하차 하거나 이동할 때 두 개의 포크사이의 거리를 너무 넓게 벌리는 것 보다는 적당한 거리를 유지하여 이동하는 것이 더 효과적인 지게차 포크를 유지할 수 있다고 사료된다.

Table 2, 3 및 4는 피로 해석 결과로서 Model 1 및 2에 대한 최대 수명과 최소 손상들을 수치로서 그 결과를 나타내었다. Table 2는 Model 1 및 2에 대하여 피로 하중의 내역에 따라 그 최대 수명들은 같은 결과를 보이지만, Table 3 및 4에서와 같이 Model 1 및 2에 대한 해석 결과로서 그 최소 손상들은 다르게 나타남을 볼 수 있다. Model 1 및 2는 포크가 닫혀 있고 열려 있는 경우를 나타낸다. 포크가 닫혀 있는 경우의 Model

Table 2 Maximum life at model 1 and 2

Fatigue Load History	Maximum Life
SAE Bracket History	3.3693×10^5
SAE Transmission	1.171×10^6
Sample History	2×10^7

Table 3 Minimum damage at model 1

Fatigue Load History	Minimum Damage
SAE Bracket History	0.1484
SAE Transmission	0.0427
Sample History	0.0025

Table 4 Minimum damage at model 2

Fatigue Load History	Minimum Damage
SAE Bracket History	854
SAE Transmission	50
Sample History	2968

1의 최소 손상은 거의 0에 가깝지만, 포크가 열려 있는 경우의 Model 2의 최소 손상은 50부터 3000정도에 까지 상당히 큰 값을 가지고 있어 내구성면에서는 Model 2가 Model 1에 비하여 취약해짐을 알 수 있어 내구성의 비교를 수치적으로 검증할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 지게차 포크에 화물을 상·하차 할 때 또는 이동할 때 지게차 포크가 닫혀있거나 완전히 벌어져 있을 경우에 발생하는 포크의 구조 변형과 응력 등을 구조 및 피로해석을 통하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 포크가 모여져 있는 Model 1의 형상이 포크가 벌어져 있는 Model 2의 형상보다 응력 값과 변형량 값이 훨씬 더 작게 나타나 내구성면에서 더 안전하다는 것을 확인하였다.
- (2) 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket History’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보였으며, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.
- (3) 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket History’의 경우에 있어 Model 1과 2는 3.3693×10^5 Cycle로서 같은 최대수명을 보였지만, 최저 손상 값에서는 포크가 열려 있는 Model 2가 854로서 닫혀 있는 Model 1에 있어서는 0.1484로서 Model 2가 Model 1에 비하여 상당히 높은 값

을 나타냈다. 지게차 포크가 닫혀있거나 완전히 벌어져 있을 때의 그 손상의 정도를 비교하여 확인함으로써 그 내구성의 비교를 수치적으로 검증할 수 있었다.

References

- (1) Park, K. D., Kim, H. J., Kim, Y. D., and Jung, J. W., 2003, "A Study of Methods of Fatigue Strength Improvement for the Suspension Material," *Proceedings of KSPE Autumn Conference*, pp. 44~49.
- (2) Lee, S. J., Lee, D. W., Hong, S. H., Cho, S. S., and Joo, W. S., 2007, "Prediction of Failure Stress of Rocker Arm Shaft using FEM and Striation," *J. of the KSPE*, Vol. 24, No. 3, pp. 84~90.
- (3) Joo, Y. S., Kim, Y. K., Kim, B. W., Moon, J. O., and Lee, K. S., 2003, "Structural analysis of a large automobile frames," *Proceedings of Korea Society of Automotive Engineers Conference*, Vol. 2, pp. 1417~1422.
- (4) Cho, J. U., and Han, M. S., 2010, "Structural Strength Analysis of Shock Absorber," *J. of the KSMPE*, Vol. 9, No. 2, pp. 53~59.
- (5) Kim, J. W., Chung, K. W., Park, J. S., and Chung, J. D., 2010, "A Life Cycle Cost Model and Procedure for the Acquisition of Rolling Stocks," *Journal of The Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 3, pp. 257~263.
- (6) Cho, J. U., and Han, M. S., 2010, "Analysis of Fatigue Damage at Wheel under Variable Load," *Journal of KSMTE*, Vol. 19, No. 6, pp. 753~759.
- (7) Suh, C. M., Oh, S. Y., Park, D. K., and Jang, J. H., 2009, "Fatigue Characteristics of Engine Rubber Mount for Automotive," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 45~53.
- (8) Swanson, J., 2010, *ANSYS 12.0*, ANSYS Inc., USA.