

3D 유한요소법을 이용한 크러셔 샤프트 강도해석

-The stress Analysis of Rotor shaft in a Vertical Impact Crusher -

유정열* · 박명균** · 박세만**

Abstract

The vertical impact crusher is the machine which could produce artificial sand similar to natural aggregates in the site of quarry and pits. FEM was used to analyse the stress and strength of the machine at high rotational speed. The test specimen was made from the same material as the shaft and tension tests were conducted. The Shaft under extreme conditions was analysed to determine maximum stress level and its location from the results. The maximum level of stress and its location could be predicted.

Key Words : FEM(유한요소법), Yield stress(항복 응력), Heat Treatment(열처리), Carbon steel for Machine Structural(기계구조용 탄소강), modal analysis(공진 해석)

1. 서론 ¹⁾

수직 임팩트 크러셔(Vertical Shaft Impact Crusher)는 석산이나 채석장에서 원석을 투입하여 골재를 제조하는 설비로, 1차파쇄(Jaw Crusher)와 2차파쇄(Con Crusher)후 1차선별(Vib.Screen)시 골재를 세척한 후, 용도에 따라 조골재를 크기별로 생산하고, Oversize와 석분을 동시에 Rotopeller로 파쇄하여 2차 선별(습식 Vib.Screen)하여 자연골재와 비슷한 조골재와 모래를 제조하는 설비이다. 국내 실정상 Crusherwkdql의 설계도면만을 입수하여 설비를 그대로 만들고 있는데, 본 연구를 통하여 Impact crusher에 사용되는 재료의 동적 기계적 성질의 규명 과 crusher구조물의 동적 특성 해석을 통하여 기계적 현상을 예측하고, 응력해석으로 crusher기계의 용량 확대와 축의 안전성을 확인하여 차기 crusher 제작에 설계 기초로 두려고 한다. 용량 확대에 가장 변수가 되는 것은 1200 rpm으로 회전하면서 1.6 m 위에서 떨어지는 돌을 파쇄하는 것을 축이 견디어 내도록 설계하는데 있다. 구조물의 대형화와 고속으로 회전하는 rotor의 축 부분에 부하되는 응력을 실험적으로 측정하는 데는 많은 어려움이 있어서, 유한요소법을 이용하여 고속 회전시 발생하는 응력을 산출하였다. 이때 회전속도 및 최대 압축 하중 부과시 발생될 수 있는 응력해석을 하였고, rotor 축이 휘어지는 극한상황에서의 발생될 수 있는 초대 응력 크기와 위치를 예측하였다. 그리고 강도해석을 위해 샤프트와 동일한 재료의 인장시험편을 제작 시험하여 기계적 물성치를 구하였다.

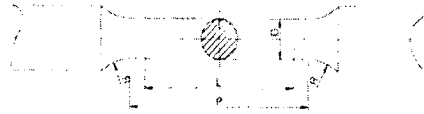
본 논문은 2004년 산학연 컨소시엄 공동수행사업의 지원으로 이루어 졌음

* 명지대학교 기계공학부 석사과정

** 명지대학교 기계공학부 교수

2. 실험 및 유한요소 해석

2.1 내장된 차체 테스트



단위 : mm			
시편 G	표준 길이 L	원형부의 길이 P	원형부의 반지름 R
12.5	50	약 60	15 이상

fig. 1 Configuration of tension specimen

유한요소 해석을 위해서 Crusher 기계에 사용되는 재료의 기계적 특성을 알기 위해 KS규격에 따라 인장시편을 제작하였다. 본 연구에서 사용된 실험 재료는 수직 임팩트 크러셔 축에 사용된 동일한 기계 구조용 탄소 강재를 사용하였으며, 열처리후의 재료의 기계적 특성을 파악하기 위해서 열처리한 시편과 열처리 하지 않은 시편을 Fig. 1과 같이 각각 10개씩 제작하였다. 시편의 단면 수축율을 알기 위하여 다음 공식을 사용하였다.

$$\text{단면수축율}(\%) = 100 \times \frac{A_i - A_f}{A_i} = 100 \times \frac{(d_i^2 - d_f^2)}{d_i^2}$$

여기서 A_i 와 d_i 는 원래단면적과 시편의 원래직경을 의미하고, A_f 와 d_f 는 최종 단면적과 최종 직경을 의미한다.

2.2 내장된 차체 테스트

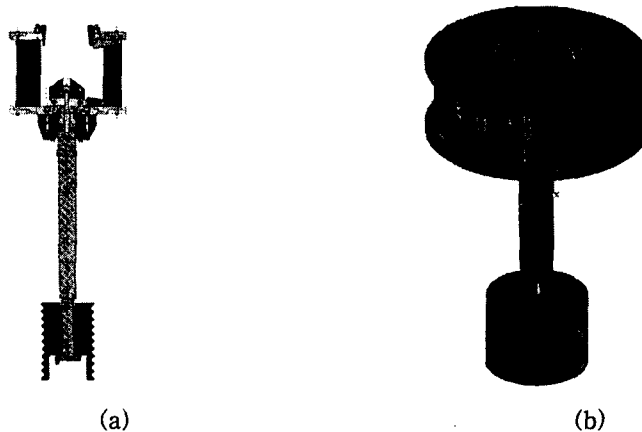


Fig. 2 (a) 2D (b) 3D modeling of Vertical Shaft Impact Crusher rotor

수직 임팩트 크러셔는 Fig. 2에 (a)와 같이 로터 부분과 축 그리고 로터 풀리 등으로 나누어

져있다. 로터의 날개 부분의 120° 간격으로 되어져 있어서 대칭조건으로 해석하는데 어려움이 있어서 도면을 기초로 하여서 Fig. 2에 (b)와 같이 전체적인 모델링을 하였다. 요소는 등방성, 등질성으로 가정하고, 8 절점 Solid 요소를 사용하였고, 크러셔의 절점은 31920 개이고 요소는 31120 개로 구성되었다. 임팩트 크러셔에 사용된 재질은 기계구조용 탄소 강재를 사용하였고, 기계적 성질은 Table 1에 나타나 있다. 그리고 극한 조건하에서 응력 집중부를 알기 위해서 로터에 기울임을 주어서 해석하였다.

2.3 경계조건 및 하중 조건

실차와 비슷한 거동을 표현하기 위하여 축의 상단 부분과 축 하단 부분에 베어링이 있는 조건을 적용하였다. 베어링과 축은 완전 고정되어 있지 않고, 축과 $0.2mm$ 정도 여유를 가진 조건을 주었고, 로터는 베어링 위에 얻어져 있는 구속조건을 주었다. 그리고 완전구속이 아닌 베어링 부분을 원주의 직교 방향으로만 구속조건을 주었다. 또한, 구조물이 많은 중량을 가진 기계이므로 자중조건을 주었다.

해석 조건은 로터가 1200 rpm 으로 회전시에 로터 각 부분에 분포되어 있는 응력을 확인하는 것이고, 초기 구동에서 각 가속도와 로터 부위에서 작용하는 구동 토크를 가했을 경우를 해석하였다. 로터에 가해지는 구동토크는 $400\text{kgf} \cdot m$ 정도이고 1200 rpm 에서는 $356\text{kgf} \cdot m$ 이다. 그리고, 돌이 로터 안에 들어가서 완전히 차 있는 조건시에 축에 부하되는 응력을 산출하는 것이다. 그리고 로터 날개에 1° , 2° , 3° 의 기울임을 준 조건하에서 암석이 있을 경우와 없을 경우를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

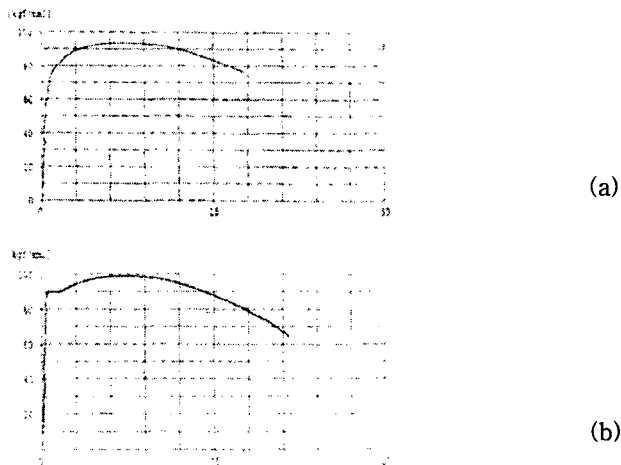


Fig. 3 Experimental result of Carbon steel for Machine Structural (a)normal (b)Heat Treatment

Table 1 Experiment result of tension

	Normal	Heat treatment
인장강도 (MPa)	350	650
yield stress (MPa)	380 (719)	510 (881)
탄성계수 (GPa)	195.84	230
파단연신율(%)	16.9	21.1
단면수축율(%)	42.9	60.7

기계 구조용 탄소강의 열처리 시편과 보통 시편을 인장시험을 통하여 Stress-Strain 곡선은 Fig. 3과 같이 나타냈고 결과는 Table. 1과 같다. 편의 열처리를 통하여 기계적 특성인 인장강도와 탄성계수 그리고 연신율 등이 개선됨을 확인할 수가 있었다.

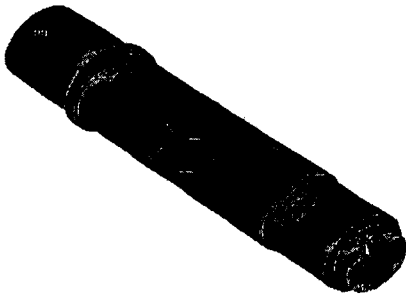


Fig. 4(a) Stress distribution on shaft

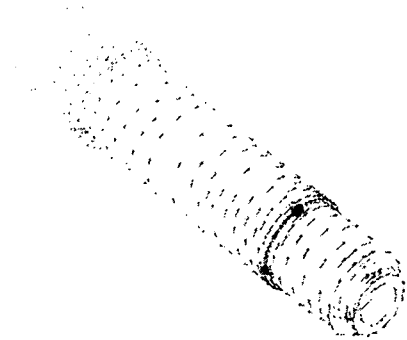


Fig. 4(b) Rotation displacement on shaft

초기 로터의 작동에서는 로터는 풀리에 작용하는 토크의 의해서 외력을 받기 때문에 비틀림 모멘트가 많이 받는다. Fig. 4(a) 와 Fig. 4(b)에는 0 rpm에서 로터가 구동될 때 작용하는 응력 분포와 변위 백터에 관하여 나타내었다. 응력은 하단 베어링 축과 벨트 풀리를 연결하는 직경이 작은 축에서 비틀림과 부하가 많이 작용함을 알 수 있다. 로터에 계속해서 동력을 전달하기 때문에 직경이 작고 풀리를 지지하고 있는 축 상단부와 축 하단부에 집중해서 분포되어있고, Table. 2에 회전수의 증가에 따른 응력분포를 나타내었다. 직접적인 로터를 받치고 있는 상단부 위에도 많은 응력이 발생함을 알 수 있었다. 축 상단부위에 분포되는 응력은 27.85 MPa 이므로 이 재료의 항복강도보다 안전한 것을 알 수 있었다. 암석이 로터 내에 투입이 도어서 회전 시에 발생하는 응력은 Table. 3에 나타내었고 최대 응력은 27.89 MPa 정도로 증가되었으나 축의 재료의 항복강도에 비해서 안전하다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 돌의 직접적인 하중의

증가가 로터 축에 작용하는 응력은 미미하다는 것을 알 수 있다.

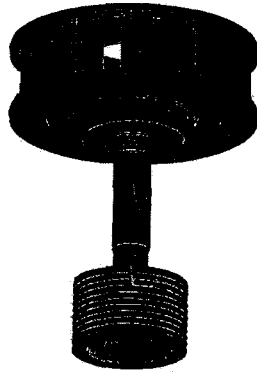


Fig. 5 Stress distribution on rotor

Table 2 Stress of the shaft on gemstone with no load

	0 rpm	600 rpm	1200 rpm
축의 상단 부분 (MPa)	20.46	21.45	27.85
축의 중간 부분 (MPa)	16.71	25.24	18.65
축의 하단 부분 (GPa)	64.55	63.24	63.32

Table 3 Stress of the shaft on gemstone with load

	0 rpm	600 rpm	1200 rpm
축의 상단 부분 (MPa)	21.52	21.62	27.89
축의 중간 부분 (MPa)	17.85	25.46	18.84
축의 하단 부분 (GPa)	59.23	63.27	62.42

Table 4 Stress according to bend shaft

	0.	1.	2.	3.
암석이 없는 경우 (MPa)	2785	8234	123	196
최대암석을 포함한 경우 (MPa)			124	

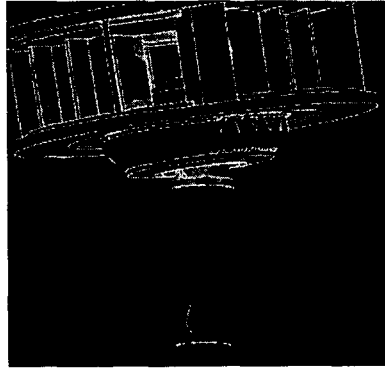


Fig. 6 Stress distribution on load and 3° bend shaft

Table 5. Result of modal analysis

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequency (Hz)	107	122	201	261	516	667	674	896

그러나 Crusher 기계의 지속적인 운행과 강의 피로 누적시에서 축 상단부의 베어링을 받치고 있는 지점에서 파단이 일어 날 수가 있다는 것을 예측할 수 있다. 극한 상황으로 로토의 상단부의 축이 기울어 졌을 경우를 가정하여서 해석해본 결과는 Table 4와 같다. 로터 축이 기울어 짐으로 인해서 로터를 지지하고 상단부 베어링 부분에 응력이 집중해서 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 지속적인 운행으로 인해서 강 of 피로 누적으로 인해 휨과 로터내에서 암석에 의한 과다 충격으로 인해서 로터를 지지하고 있는 상단 베어링 부분이 기울어 졌을 경우를 가정하여서 해석을 해본 결과는 응력 증가에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그러므로 강이 가지고 있는 반복 피로누적에 대해서 구체적으로 연구하여 Crusher 기계의 수명을 예측하고 부과 하중에 상당한 영향을 받는 축의 교체도 고려해 보아야 할 것이다. 그리고 암석의 과다 충격을 예방하기 위해서 적절한 크기의 암석을 선별하는 것도 중요하다는 것을 알 수 있다.

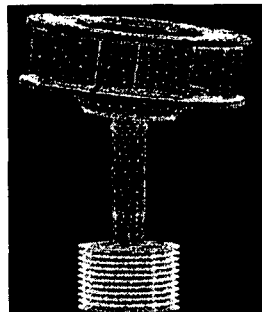


Fig. 7 1st mode shape

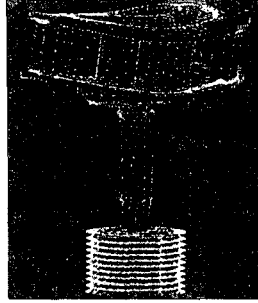


Fig. 8 8th mode shape

공진해석결과는 Table. 5와 같이 나타내었다. 그리고 그에 따른 공진 모드 형상은 Fig. 7와 Fig. 8에 나타내었다. 로터가 가지고 있는 1차 공진점은 107Hz 로 나왔고 rpm 으로 환산하면 6420rpm 에서 로터가 공진이 일어나는 결과가 알 수 있다. 그러나 극한조건에서 로터의 회전과 암석의 충격으로 인해서 생기는 부과적인 진동의 증가가 있어서 공진점에 도달할 수 있기 때문에 방진무제에 관심을 가질 필요가 있다. 본 연구에서 해석의 주안점을 로터의 회전에 의한 원심력의 증가와 구동에 의한 각 가속도를 고려하여서 로터에 발생하는 응력 분포를 연구하였다.

수직 임팩트 크러셔의 용량의 확대를 위해서는 지지하고 있는 축의 강도해석을 고려하여서 구동시에는 V-Belt 풀리와 하단 베어링 축을 연결하고 있는 부위에 대한 설계를 상기 결과로 알 수 있다. 크러셔의 수명을 위해서는 상단 베어링 부위의 보강이 되어서 계속적인 피로 누적에도 긴 수명을 유지 할 수 있도록 설계되어야 한다는 것을 위의 결과로 알 수 있다.

4. 결 론

현재 설계되어진 로터의 회전력 부과에 따른 응력 분포를 확인해본 결과 안전하다는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 상단 축에서 축이 휘어지는 극한 상황시에 예상되는 사고를 방지하기 위해 이 부분에 대한 보강이 더 필요하고 판단된다. 그리고 구동시에서 축이 가장 많은 응력을 받기 때문에 강의 피로 실험을 통하여 샤프트의 수명을 예측하여 운행중에 발생할 수 있는 사고를 막을 수 있다고 사료된다.

5. 후 기

이 연구는 광산기공과 2001 경기도 산학협동 컨소시엄 지원 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

6. 참 고 문 헌

[1] Daryl L. Logen, " A First Course in The Finite Element Method", PWS publishing

Company, 1993.

- [2] Bends, M.P., Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method", *Comp. Meth. Appl. Mech.*, vol. 71, pp.197-224, 1988.
- [3] Kim, Y. Y., Yoon, G.H., "Multi-resolution multi-scale topology optimization a new paradigm. *International Journal of Solids and Structures*", Vol. 37, pp.
- [4] Kim, Y.Y. and Earmme. "Variable Reduction Method Using the Multiresolution Multiscale Topology Optimization Strategy", Submitted, 2000.
- [5] Lee, A. W., F., Sweldens, W., Schroder, P., Cowsar, L., and Dobkin, D., "Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces. *Proceeding of SIGGRAPH98*, pp.95-104, 1998.
- [6] Vanderplaats, G.N., "ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis NASA CR 172460, 1984.