

변동 하중을 받는 구조물에서의 피로 파손 해석

한 문 식^{*1)} · 조 재 응²⁾

계명대학교 기계·자동차공학부¹⁾ · 천안공업대학 자동차과²⁾

The Analysis of Fatigue Damage in Structure under Variable Load

Moonsik Han^{*1)} · Jaeung Cho²⁾

¹⁾Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾Department of Automobile, Cheonan National Technical College, Chungnam 330-717, Korea

(Received 10 May 2004 / Accepted 2 June 2004)

Abstract : The variable fatigue load is simulated in this study. The stability and the life of the material are analyzed theoretically by the program of Ansys workbench. These results are successfully applied to the practical structures to predict the prevention of fracture and the endurance. The life and the damage on the every part of the fatigue specimen can be predicted. As the available lives are compared for every loading variation, the rainflow and damage matrix results can be helpful in determining the effects of small stress cycles in any loading history. The rainflow and damage matrices illustrate the possible effects of infinite life. The safety and stability of fatigue specimen according to the variable load can be estimated by using the results of this study.

Key words : Fatigue life(피로 수명), Damage(파손), Fatigue sensitivity(피로 민감도), Rainflow matrix (rainflow 매트릭스), Damage matrix(손상 매트릭스)

1. 서 론

일반적으로 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 내지 구조물에 있어서 파손이 일어나는 경우가 많으며 특히 고장력강 등과 같은 경우 의외로 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서도 파괴가 잘 일어난다. 따라서 이를 규명하기 위한 여러 가지 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 이들에 대하여는 파괴역학과 통계적인 방법을 이용한 여러 가지 연구가 발표되고 있다.¹⁾ 자동차나 구조물에 있어서는 피로나 파괴를 규명하기 위해서 피로 균열, 압축 잔류응력, 또한 최적화 설계 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁻⁴⁾ 또한 구조물 파괴의 50-90%는

피로에 의한 것으로 추정되며 그 중에서 대부분의 피로 파괴는 불규칙적으로 일어나고 있어 이론 해석에 의하지 않고서는 그 예측이 불가능한 실정이다. 상용되는 여러 가지의 피로에 대한 해석 프로그램들이 있지만 본 연구에서는 다른 피로 해석 Tool 들에 비하여 정확하고 효율적인 해석 결과를 얻을 수 있고 응력-피로수명의 해석 결과들에 대한 수렴성이 좋은 피로 설계 전용 Ansys workbench 프로그램을 사용하였다.^{5,6)}

본 연구에서는 현장에서 쉽게 볼 수 있는 변동 피로하중을 받는 재료를 시뮬레이션을 하였고 그 재료의 안전성과 수명 관계를 해석하였다. 또한 기초적으로 해석의 간편화를 위하여 변동 피로하중이 작용되는 간편한 모델을 사용하였다. 그 연구 내용

*To whom correspondence should be addressed.
sheffhan@kmu.ac.kr

으로서는 피로를 받는 모델의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있었다. 그리고 피로에 있어서 평균 응력을 다양하게 보정을 하여서 그것들 중 가장 안전한 피로 하중형식을 택하여 보았다. 또한 무한 수명을 설계할 수 있는 자료인 rainflow와 손상 매트릭스들에 의하여 어떠한 작은 응력의 피로 사이클들일지라도 그 재료에 대한 영향을 알아 낼 수 있었다.

이러한 본 연구의 결과를 종합하여 실구조물에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토·예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 본 연구에서의 모델 및 해석절차

2.1 유한요소모델

본 연구에서의 해석모델인 시험편의 유한요소분할모습과 치수(단위:mm)는 Fig. 1과 같다.

절점들과 요소들의 개수는 각각 4631 및 912이며 시험편의 재료 특성은 Table 1에 나타나 있다. 그 구속 조건은 위쪽 면에 구속되어 있고 평균 압력은 100MPa에 의해서 시험편의 위쪽에 가해지고 있다. 본 논문의 해석에 있어서는 피로에 대한 재료 특성들을 정확하게 입력할 수 있다. 또한 단순한 피로 곡선에 대한 실험 데이터에는 구조용 강과 알루미늄 재료들에만 나와 있다.⁷⁾ 더 많은 정확한 분석^{8,9)}에 대하여는 고유한 재료 특성의 피로 데이터를 입력할 수 있도록 사용자의 의향대로 고칠 수 있다. 그리고 이러한 피로 재료들의 데이터는 각 교번 응력에 대한 수명들을 Table화하여서 만들어 질 수 있다.

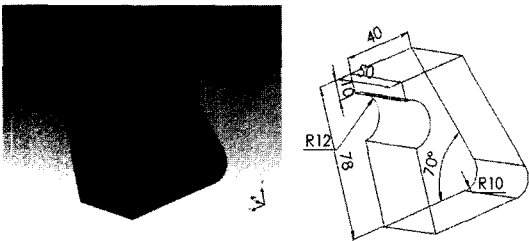


Fig. 1 The mesh and dimensions of the specimen (unit :mm)

Table 1 Material properties

Structural properties	
Young's modulus	2e+055 MPa
Poisson's ratio	0.3
Mass density	7.85e-006kg/mm ³
Thermal expansion coefficient	1.2e-005 1/°C
Stress limits	
Tensile yield	250 MPa
Compressive yield	250 MPa
Tensile ultimate	460 MPa
Compressive ultimate	0 MPa
Thermal properties	
Specific heat	434 J/kg · °C
Fatigue properties	
Interpolation	Log-Log
Mean curve type	Mean stress

2.2 해석모델의 하중조건

Fig. 2는 피로 재료에 대한 데이터를 보여 주는 그림으로서 x축상에서는 사이클 수이고 y축상에서는 교번응력 값을 나타낸 그림들이다. 이에 대한 피로의 결과들은 응력 해석이 수행되기 전이나 후에 추가 될 수 있다. 또한 피로 Tool로서 평균 응력과 여러 가지 하중의 형태들을 정의하여 그 하중 조건들을 설명할 수 있다.

피로 Tool로서는 시간에 따라 한 부분에 대한 하중을 변화시킬 수 있는데, 본 해석에서는 하나의 축 방향 응력에 대하여 정적 응력의 안전성을 구하는 Tool들과는 달리, 어떤 한 점에서 응력이 시간에 따라 변하는 경우에 대하여 해석한 것이다. 또한 피로의 해석들은 균일 진폭 하중이나 변동 진폭하중들

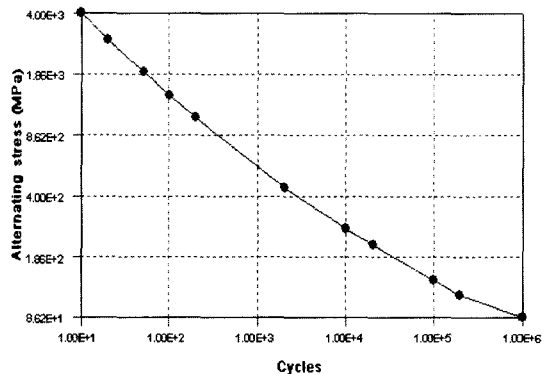


Fig. 2 S-N curves in fatigue

에 대하여 수행될 수 있다. 본 연구에 있어서는 변동 진폭하중의 방법이 채택된다. 기본 하중에 대하여 배율을 적용할 수 있다.

이 배율은 0.003이다. 이 경우에는, 오직 한 세트의 결과만이 필요로 되거나 교번 응력과 평균 응력을 계산하기 위해서는 단 하나의 하중 배율을 사용하는 것 뿐 아니라 하중 배율이 시간에 따라 변동하게 한다.

또한 본 연구에서는 사이클 계산과 손상의 합계를 포함하는 누적된 손상을 계산한다. 하중의 배율은 외부의 데이터 파일로부터 입력할 수 있는데, Fig. 3과 같이 변동 진폭하중에 대한 배율들의 목록을 나타내고 있다. 본 프로그램의 피로 Tool에서는 설정된 내역 데이터로부터 하중의 형을 셀팅(setting)함으로써 불규칙 진폭 하중을 지정할 수 있다.

본 연구에서는 rainflow 계산법이 사용되어지는데, 부분적인 파손에 대하여 계산되어지기 전에 우선 교번 응력과 평균 응력들은 그림의 결과들에 나타낼 빈도들로서 이루어진다. 교번 응력이 S-N 곡선의 범위를 벗어난다면 무한 수명 값이 사용되어지는데, 더 높은 수치로 정확하게 되면 상대적으로 응력 사이클들이 작게 되어 손상을 더 없게 만든다. 본 연구에 있어서는 무한 수명으로서는 10^9 사이클로 정하고 있다.

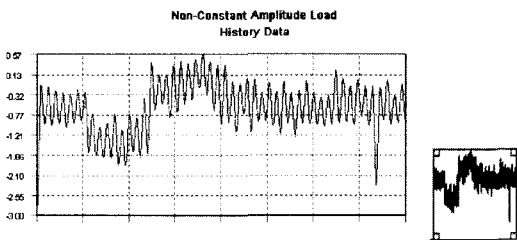


Fig. 3 Loading history

2.3 해석 절차

피로 시험들은 일정 크기 또는 zero의 평균 응력 상태에서 하나의 축 하중으로 항상 가하여진다. 몇 가지 분석의 옵션들을 변동진폭하중에 대하여 사용할 수 있는데, Fig. 4는 평균 응력의 값들을 조절하기 위한 방법에 대한 그림들이다.

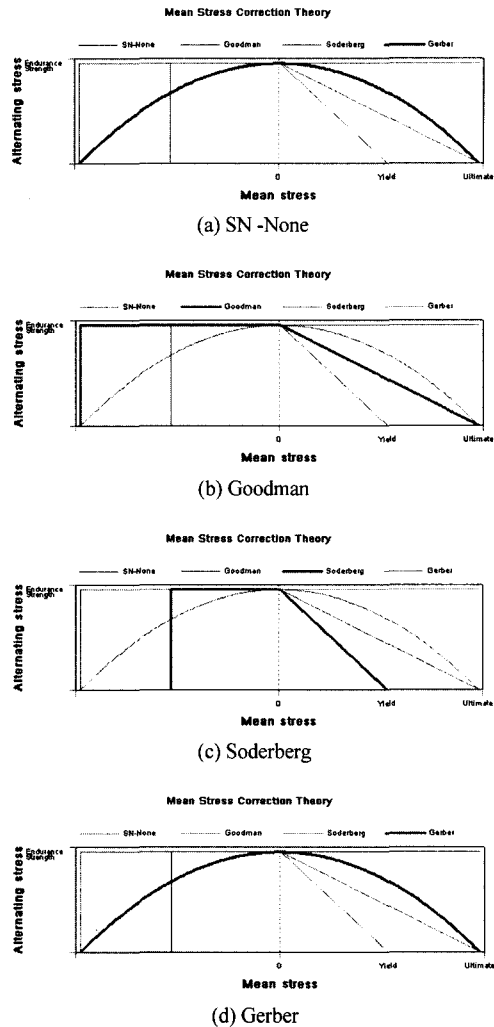


Fig. 4 Mean stress correction theory

Fig. 4는 평균 응력 보정 이론을 그래프로 설명하고 있는데 SN-None, Goodman, Soderberg, Gerber 이론들에 대하여 평균 응력에 대한 교번 응력으로서 각각 (a), (b), (c), (d)로 그려져 있다. 해석 시에는 이 피로의 Tool들 중의 하나를 선택할 수 있다. 서로 다른 평균 응력들 혹은 r-ratio에 의한 실험 데이터가 있다면, 평균 응력은 재료 곡선들 사이에서의 보정을 통해 직접 정할 수 있다. 만약 실험 데이터를 사용하지 않는다면, Gerber, Goodman, 및 Soderberg 이론들을 택할 수 있다. 이들 이론들은 평균 응력들을 설명하기 위한 S-N 데이터들과 함께 정적 재료 특성(항복 응력, 인장응력 등)들을 사용한다. Goodman

이론은 보통 취성 재료들에 대한 것이고 Gerber 이론은 연성 재료에 대한 것이다.

Fig. 4에 보여진 바와 같이, Gerber 이론은 (-), (+) 평균 응력들을 같게 하는 반면에 Goodman 및 Soderberg 이론은 (-)평균 응력들에 대한 어떤 보정도 하지 않으며 (-)의 압축 평균 응력은 피로 크랙 진전을 지연시킬지라도, (-)응력을 무시할 수도 있다. 또한 경험적인 평균 응력 이론을 택한다면 여러 개의 S-N 곡선들이 정의되어 있을지라도, 평균 응력들은 무시될 수 있다. 따라서, 만약 여러 개의 r-ratio S-N 곡선들을 가지고서 Goodman 이론을 사용한다면, $r = -1$ 에서의 S-N 곡선이 사용된다.

또한 피로에서 교번 응력을 수정 계수로 나눈다는 것은 피로 강도를 피로강도계수(K_f)로 곱하는 것과 같다. 또한 이 계수는 교번 응력에만 적용되고 평균 응력에는 영향을 끼치지 않는다. 본 연구에서의 이 계수는 0.8로 정하고 있다.

3. 해석 결과

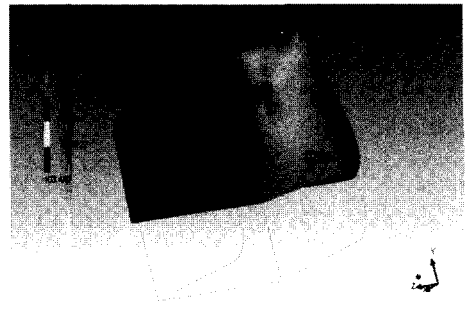
피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, 피로의 민감성, rainflow 매트릭스 및 손상 매트릭스들을 포함하고 있다. 각각의 출력들은 SN-None, Goodman, Soderberg 그리고 Gerber의 하중들로서 서로 비교될 수 있다.

본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 5에 나타나 있다.

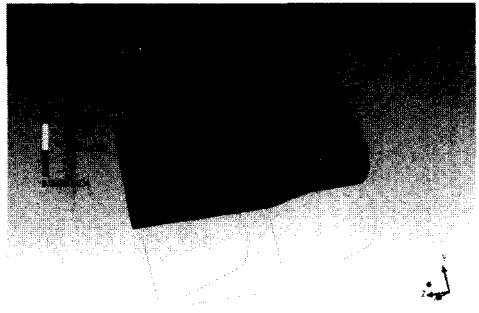
이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 되어 있거나 주어진 부분이나 표면에 한정될 수 있다. 또한 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다.

변동진폭의 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 부분이 파괴될 때까지의 하중의 기간에 대해서는 블록 수들로 나타내 준다. 따라서 주어진 하중의 내역이 한 달 간의 하중을 표현하고 그 수명이 120으로 된다면, 예측되는 모델의 수명은 120개월이 된다.

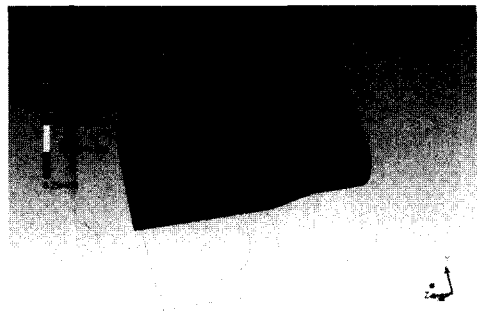
Fig. 5에서 (a)의 경우에 있어서는 위쪽 부분에 있는 긴 홈 주위의 부위와 아래 쪽 구석에서 2×10^7 의 수명이 되고 다른 부위에서는 수명이 짧아져서 긴 홈의 안 쪽 부위와 위쪽 구석에서 최소의 수명이 10^3 정도까지 떨어져 있음을 알 수 있다. (c)의 경우



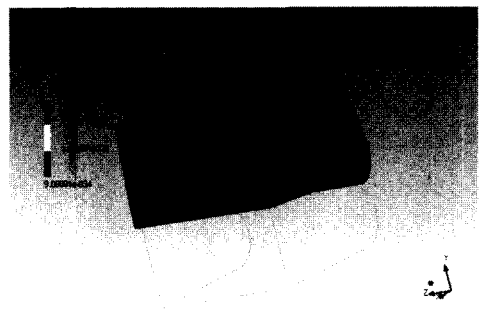
(a) SN-None



(b) Goodman



(c) Soderberg



(d) Gerber

Fig. 5 Contour plots of available lives

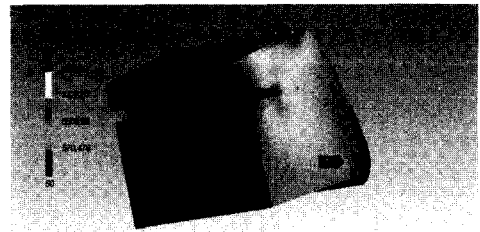
에 있어서는 거의 전역에서 2×10^7 의 수명이 되나 홈 안쪽 부위와 위쪽 구석에서는 그 수명이 극히 짧아져서 6.25×10^{34} 으로 되는 것을 알 수 있었다. 반면 (b)와 (d)의 경우에 있어서는 거의 전역에서 2×10^7 의 수명이 되나 약간의 위쪽 구석에서 9.091×10^{-34} 으로 되어서 (c)의 경우 보다는 그 수명이 길어져 안정된 것을 보여 주고 있다. 대체로 (a)의 경우에 그 수명은 어떤 다른 경우들보다 더 짧은 경우들이고 (b), (c), (d)의 경우에 있어서는 그 수명은 더 길게 된다. 그러나 (b), (c), (d)의 경우는 (a)의 경우보다 국부적인 부분에서 극히 그 수명이 짧아져서 안정성이 나빠지기 때문에 오히려 (a)의 경우가 그 안정성이 더 좋을 수 있다.

Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 사용 가능 수명으로 나누어진 설계 수명으로 정의되어진 계수이고 그 설계 수명은 본 해석 프로그램의 제어판에서 정할 수 있다.

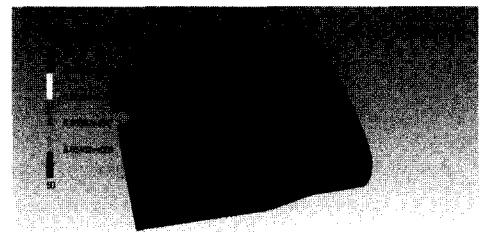
4가지 경우들을 비교할 수 있는데, (a)의 경우에 있어서는 시험편의 긴 홈 주위의 부분과 아래쪽의 구석 부위가 50(피로손상의 계수)이 되어 안정되나 역시 긴 홈의 안쪽 부위와 위쪽 구석에서 제일 손상의 위험이 커져 9.6673×10^6 이 되어 있다. (c)의 경우에 있어서는 전역에서 50으로 되어 안정되나 긴 홈의 안쪽 부위와 위쪽 구석에서 1.6×10^{42} 으로 되어 극히 이 부분이 손상의 위험이 있을 가능성이 높다. (b)와 (d)의 경우는 같은 경향을 보이고 있으며 시험편의 전역에서 50으로 되어 안정됨을 보이고 있다. 시험편의 위쪽 구석에서는 1.1×10^{42} 이 되어 손상의 위험이 있으나 (c)의 경우보다는 더 안정이 되어 있음을 보이고 있다. 따라서 (a)의 경우가 그 안정성이 가장 좋을 수 있다.

Fig. 7은 피로 민감도의 그림들을 나타내고 있다. 역시 4가지 경우들에 대한 하중 변화들에 따라서 사용 가능한 수명들을 비교할 수 있는데, (a), (b), (c), (d)의 각 이론에 대한 하중의 변화에 대하여 유용 가능한 수명을 나타낸 것이다. 하중의 변화는 하중의 진폭을 평균 하중으로 나눈 값이다.

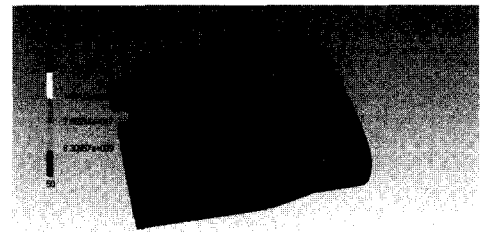
피로 민감도는 손상에 대한 사용 가능한 수명에 대하여 보여 준다. 예를 들면, 현재 하중의 150%를 부과했다면 현재 하중의 50%를 초과한다는 것을 모



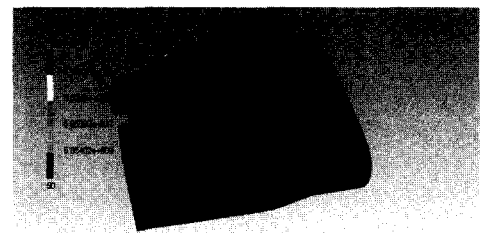
(a) SN -None



(b) Goodman



(c) Soderberg



(d) Gerber

Fig. 6 Contour plots of the fatigue damages

델의 수명 민감도로서 볼 수 있다. 이 그림상에서 1의 x값은 모델의 현재 하중에서의 수명에 해당한다. 만약 해석상의 하중들이 현행의 것들보다 50% 보다 크다면 1.5의 x값은 임계 피로 수명에 해당되는데 선형, Log-X, Log-Y, 또는 Log-Log 스케일들 중의 하나를 택할 수 있다. 또한 민감도 옵션들에 대한 디플트 값들을 조정 판넬로서도 정할 수 있다.

(a)의 경우는 하중의 변화가 0.5일 때는 823.271, 1.5일 때는 0이 되어서 안정스럽게 변화된다.

(b)의 경우는 하중의 변화가 0.5일 때는 821.910, 0.7 이후부터는 0이 되어 버린다.

(c)의 경우는 하중의 변화가 0.5일 때는 1.111×10^{-33} , 계단형으로 변화되어서 1.15 정도부터는 0이 된다.

(d)의 경우는 하중의 변화가 0.5일 때는 325.3999, 0.7 이후부터는 0이 된다.

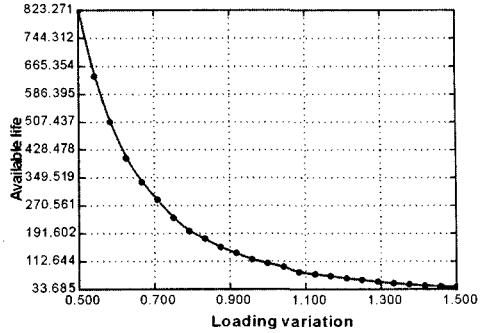
따라서 하중의 변화에 대해서는 (a)의 경우는 그 수명이 가장 안정스럽게 변화되고 있다.

(d)의 경우는 대체로 하중의 변화가 0.7까지는 안정을 보이고 (b)의 경우는 (d)의 경우와 같은 경향을 보이거나 하중의 변화에 따라 더 급히 수명이 감소됨을 보이고 있다. (c)의 경우는 거의 하중의 변화에 대하여 그 수명이 0이 되어서 하중의 변화에 대하여 파단의 위험이 가장 높음을 보이고 있다.

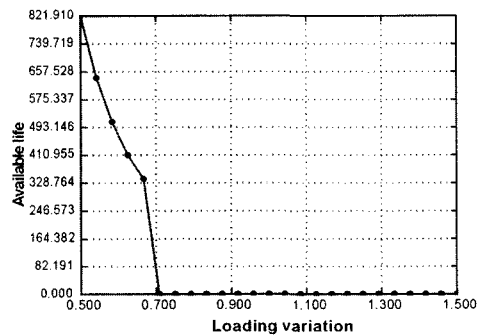
Fig. 8은 임계 위치에 대한 rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 변동진폭하중에 대해서만 적용된다.

Fig. 8은 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 교번 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 교번 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다.

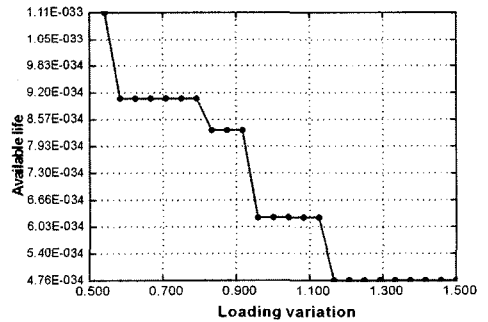
대부분의 교번 응력 사이클들은 -평균 응력의 범위 즉 0부터 2×10^5 MPa의 범위에서 일어난다. 대부분의 교번 응력들은 (+)의 평균 응력 범위 즉 0부터 1×10^5 MPa의 범위들을 가지고 있고 그 최대의 빈도수는 5정도임을 알 수 있다. 그리고 대부분의 작은 교번 응력들은 더 큰 교번 응력들보다 높은 평균 응력들을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. (a), (b), (c) 및 (d) 4가지의 경우가 거의 같은 경향을 보이고 있으며 대부분의 교번 응력 사이클들은 더 낮은 교번



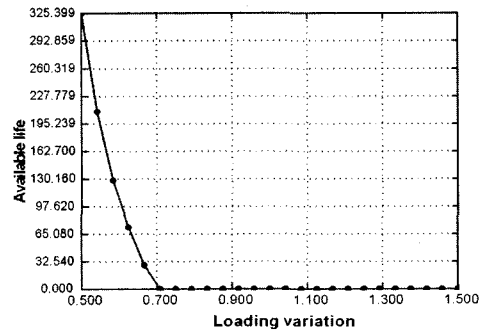
(a)SN-None



(b) Goodman



(c) Soderberg



(d) Gerber

Fig. 7 Fatigue sensitivity plots

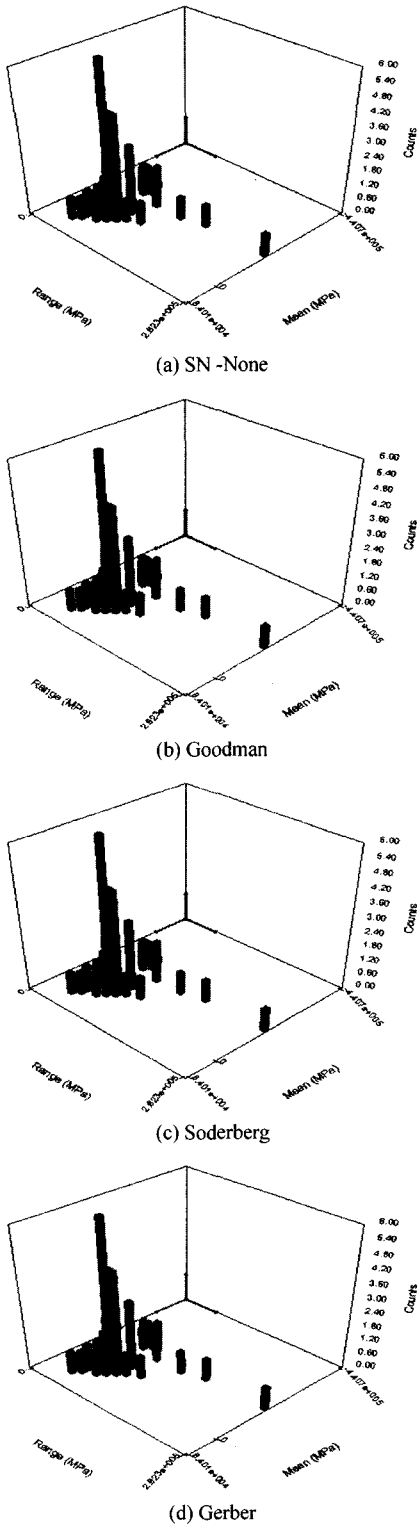


Fig. 8 The plots of rainflow matrices

응력에서 일어남을 알 수 있다.

Fig. 9는 본 연구 모델에서 임계 위치에서의 손상 매트릭스들에 대한 그림들로서 변동진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. 이 결과의 원인이 되는 각각의 빈도수는 z축상에서 나타내는 상대적인 손상의 빈도수를 제외하고는 Fig. 8의 rainflow 매트릭스들에 대한 그림들과 유사하다.

(a), (b), (c) 및 (d)의 경우 공히 손상의 가능 범위가 응력 진폭은 0부터 1.5×10^5 MPa의 경우에 주로 일어나며 평균 응력은 0부터 -2×10^6 MPa의 경우에 주로 일어나고 있다.

(a)의 경우의 상대적인 손상은 약 8% 이내를 보이고 있다. 단, 응력 진폭이 2.823×10^5 MPa의 경우에는 그 상대적인 손상의 범위가 약 28%를 보이고 있다. (b)의 경우는 평균 응력이 -2×10^6 MPa의 경우에 있어서 약 8%의 손상 가능성을 보이고 다른 범위에서는 거의 0%의 손상 가능성을 보이고 있다. (c)의 경우는 평균 응력이 -1×10^6 MPa부터 -2×10^6 MPa의 경우에 있어서 약 6%의 손상 가능성을 보이고 다른 범위에서는 거의 0%의 손상 가능성을 보이고 있다. (d)의 경우는 평균 응력이 0부터 -2×10^6 MPa의 경우에 있어서는 (c)의 경우보다는 다소 높아진 약 8%의 손상 가능성을 보이고 다른 범위에서는 거의 0%의 손상 가능성을 보이고 있다.

따라서 (a)의 경우에서의 상대적인 손상은 어떤 다른 경우들보다는 좀 더 높은 응력 진폭에서 일어나서 가장 안정성이 좋음을 알 수 있다. (b)의 경우에 있어서는 (a) 보다는 불안정된 경향을 보이고 있다. 그러나 (c)의 경우는 (b)의 경우보다는 안정된 경향을 보이고 있고 (c)와 (d)의 경우에 있어서는 상대적인 손상은 다소 낮은 응력 진폭에서 일어남을 알 수 있다.

따라서 rainflow 매트릭스에 대하여 상응하는 손상 매트릭스로부터 알 수 있는 바와 같이, 특별한 경우에는 낮은 응력 진폭에서 일어날지라도, 대부분의 손상은 더 높은 응력 진폭들에서 일어남을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 피로를 받는 모델의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있고 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있다.
- 2) SN-None, Goodman, Soderberg, Gerber의 평균 응력 보정 이론들 중에서 비교적 하중의 변화가 작은 SN-None 이론을 적용하는 피로 하중 형식이 가장 안전한 경향을 보이고 있다.
- 3) 어떠한 하중을 받더라도 rainflow와 손상 매트릭스의 결과들은 작은 응력 사이클의 영향들을 알아낼 수 있다. 또한 rainflow와 손상 매트릭스들은 무한 수명을 설계할 수 있는 자료들이라고 사료된다.
- 4) Ansys workbench의 피로 tool들에 의하여 안전성과 내구성 예측할 수 있어 이러한 결과들을 불규칙 하중을 받는 실제 구조물에 응용하면 그 활용이 클 것으로 보인다.

References

- 1) S. Tanaka, M. Ichikawa, S. Akita, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," Eng. Frac. Mech., Vol.20, pp.501-513, 1984.
- 2) W. C. Park, S. C. Huh, J. W. Jung, H. W. Lee, M. H. Boo, "A Study on Fatigue Crack Behavior of Metal Matrix Composites for Automobile Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.140-146, 2003.
- 3) K. D. Park, C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot Peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
- 4) S. Y. Han, S. Y. Song, "Shape Optimization of Structures in Opening Mode," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.141-149, 2002.
- 5) J. Swanson, Design Space, Ansys Workbench, Ansys, Inc., 2003.
- 6) D. A. Hancq, A. J. Walters, J. L. Beuth,

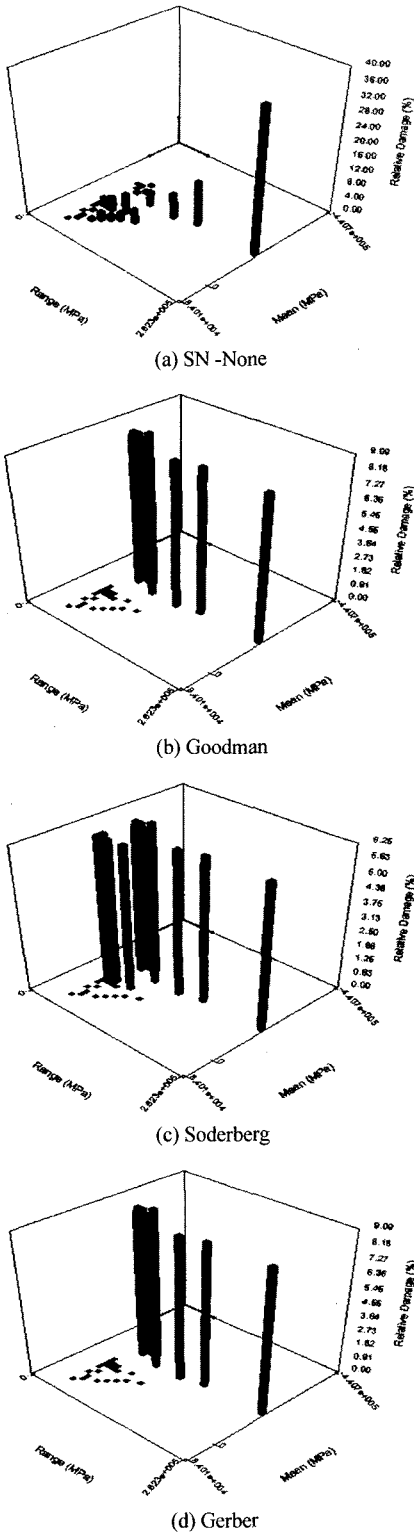


Fig. 9 The plots of damage matrices

- “Development of an Object Oriented Fatigue Tool,” Engineering with Computers, Vol.16, pp.131-144, 2000.
- 7) J. Bannantine, J. Comer, J. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, New Jersey, Prentice Hall, 1990.
- 8) S. R. Lampman, “Fatigue and Fracture,” ASM Handbook, ASM International, Vol.19, 1996.
- 9) U.S. Dept. of Defense, Metallic materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5H, 1988.