

피로내구해석 전용 프로그램 - MSC.Fatigue -

이 증 규*

1. 개발배경과 필요성

1982년 미국 BATTELLE는 국무부 요청에 따라 정부 산하기관의 운용장비 중 피로파괴 문제에 연관된 손실비용을 조사하였는데, 그 결과 1970년대의 1년 평균 손실비용은 약 1,500만불(약 195억 원)의 손실을 입었다고 보고하였다. 더불어 이 비용은 조사범위가 정부기관으로 국한된 것이기에 나라 전체의 피로파괴에 의한 대한 손실비용을 추산한다면 몇 십 배로 증폭할 것이라고 예상했다. 또한 그는 하중을 받는 구조물의 파손(Failure) 원인의 80(90%)가 피로문제에 의한 것이라고 분석하였다. 한편, 영국에서 발간된 한 자료에는 대부분의 국가가 피로문제로 인하여 매년 GNP대비 약 3(4%) 손실을 입는 것으로 분석하였다. 이러한 내용으로부터 제품생산 전에 피로내구해석을 수행하여 적절한 내구성을 갖는 구조물을 설계할 수 있다면 많은 경제적 이익을 갖을 수 있다.

피로내구에 대한 연구는 일찍이 선박을 만들어 많은 대륙과 해양을 지배해 왔던 유럽지역, 특히 영국에서 오래 전부터 진행되어 왔다. MSC. Fatigue는 피로내구해석 전용 프로그램으로 MSC(MacNeal

Schwendler Corporation)의 피로내구해석 소프트웨어 개발 Partner사인 영국의 nCode International가 1990년에 개발하였다. nCode International은 전 세계적으로 피로내구 분야에서 가장 권위가 있는 대학 중 하나인 Scheffield University의 교수들이 1981년에 설립한 회사로서 세계 최초로 피로내구 해석과 시험에 관련된 상용 프로그램을 개발에 성공하였다.

1990년에 개발된 본 프로그램은 Solver로서 적합한 전후처리 프로그램이 없어 고민하다가 전 세계적으로 널리 분포되어 사용되는 MSC.Patran을 전용 전후처리 프로그램으로 채택하여 사용되고 있다. 현재 MSC.Fatigue는 NASA, Boeing, GM, BMW 등의 전 세계 유수 항공, 조선, 자동차, 전자전기 및 연구소 분야에서 널리 사용되고 있으며, 우리나라에서도 대부분의 자동차완성업체와 부품업체, 항공업체, 조선업체, 연구소, 대학교 등에서 연구 및 현업에 기여하고 있다.

2. 해석의 프로세서

피로내구해석을 수행하기 위해서는 여러 가지

* 한국엠에스씨(주) 차장

인자들을 고려하여야 하나, 우선적으로 고려해야 될 항목은 하중이력(Load Time History)과 재료의 피로물성(Fatigue Characteristics)이다. 먼저 하중이력은 해석하고자 하는 구조물에 작용하는 부하(Load)의 이력으로 시간형태(Time Domain)와 주파수형태(Frequency Domain)가 존재한다. 부하의 종류로는 압력, 응력, 변위, 온도 등이 가능하며, 작성상에서 주의해야 할 점은 이력의 데이터 수를 지정하는 샘플링레이트(Sampling Rate)이다. 즉 해석결과와 비교할 시험결과가 필드(Field, Service Load)와 시험실(Lab)인 경우, 각각 적용된 샘플링레이트가 다르므로 해석에서는 이 점에 주의하여야 한다.

재료의 피로특성은 선택한 피로내구해석의 종류에 따라 요구되는 특성 값들이 다르기 때문에 각 해석에 적합한 데이터가 준비되어야 한다. 예를 들어 S-N Approach를 적용할 경우에는 재료의 S-N Curve와 피로강도지수(Fatigue Strength Exponent, b)가 필요하며, ϵ -N Approach인 경우에는 재료의 ϵ -N Curve와 반복소성경화지수(Cyclic Strength Coefficient, K'), 반복소성경화지수(Cyclic Strain Hardening Exponent, n') 등이 필요하다.

MSC.Fatigue는 하중이력과 재료의 피로물성을 지원하기 위한 여러 기능을 지원하는데, 먼저 14가지의 방법으로 하중이력을 생성시킬 수 있으며 여기에는 주파수형태의 이력 작성 기능이 물론 포함되어 있다. 또한 현재 산업계에서 널리 사용되는 SAE, ASTM의 표준화된 이력 18가지를 Central History Database에서 지원하고 있다. 한편 피로물성에 관련된 기능을 제공하기 위하여 199가지 재료의 S-N Curve, ϵ -N Curve, da/dN - ΔK , Spotwelded S-N Curve, Seamwelded S-N Curve가 Central Material Database에 저장되어 있고, 기타 일반 재료의 피로특성 곡선도 생성시켜 관리할 수 있다. 개략적인 피로내구해석의 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다.

이 두 가지 항목이외에 해석에 필요한 입력조건은 유한요소 모델과 구조해석 결과에서 산출된 결과 값들이다. 그 이유는 피로내구해석을 수행하기 위하여 해석목적에 적합한 구조해석을 먼저 수행하여 Stress Tensor, Strain Tensor 및 Element Force 등을 산출한 후 작용하는 하중이력과 재료의 피로특성 값을 적용시켜 요소(Element)별 혹은 절점(Node)별 피로손상과 피로수명을 산출하는 프로세

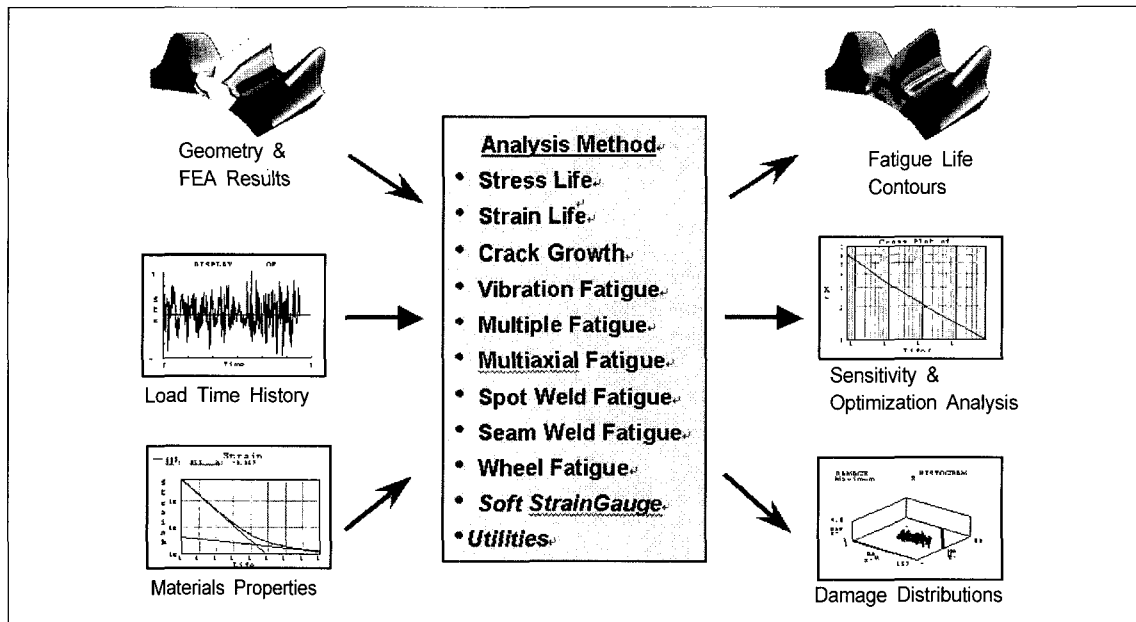


Fig. 1 피로내구해석의 흐름도

스를 갖고 있기 때문이다.

이상의 입력 조건들을 이용하여 Fig. 1의 가운데 Box내에 나타냈듯이 적합한 피로내구해석 방법을 선택 구동 시키면 크게 3 가지군의 해석결과를 얻는다. 첫번째는 대상 모델의 피로손상(Fatigue Damage)과 피로수명(Fatigue Life)의 분포를 얻을 수 있다. 물론 Fig. 2(b)와 같이 이 결과들을 Text 형태로 출력할 수 있다. 두 번째 결과군은 피로내구해석의 최적설계와 민감도를 파악할 수 있는 기능으로 산출된 결과에 표면처리(Surface Treatment), 표면 후처리(Surface Finish), 평균응력(Mean Stress)의 선택 조건 등을 변경시켰을 때 피로특성을 파악할 수 있는 내용이다(Fig. 2(c), (d) 참조). 마지막 세 번째 결과군은 작용 이력의 3D Matrix 분포 및 피로손상의 분포 등을 산출하는 것으로 이로부터 대상 구조물이 만족하지 못한 피로특성을 가지고 있다면 설계변경에 필요한 피로특성의 분석 데이터를 지원하는 내용이다. 산출된 피로수명의 두

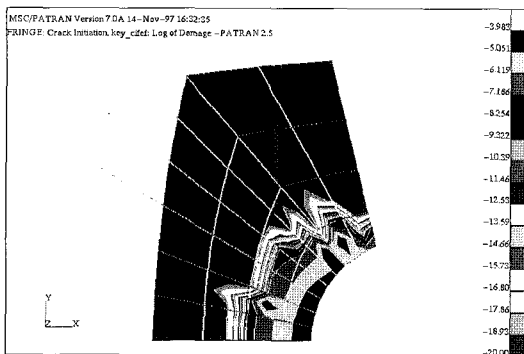
가지 형태와 표면처리 변경에 따른 피로특성 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

3. 피로내구해석의 종류

본 장에서는 현재 MSC.Fatigue내에서 수행 가능한 피로내구해석의 종류와 각 특징을 살펴보고록 한다.

3.1 Stress Life(Total Life) Approach

본 방법은 대상 모델의 균열시작과 균열진전의 구분 없이 완전 파단까지의 전체 피로수명 예측에 사용되며, 기본적으로 Miner Damage Rule을 채택하고 주로 고 피로이수 피로(High Cycle Fatigue) 영역에 사용되는 특징이 있다. 특히 Arc 용접구조물에 대해서도 BS(British Standard) 코드를 적용한 내구해석을 수행할 수 있다. 즉 상세한 내부 프



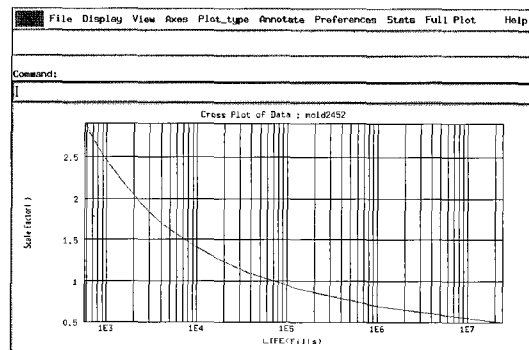
(a) 피로수명의 Binary 형태

Node	Damage	Life (Repeats)
1	1.04E-4	9618
2	9.776E-5	10229
3	9.369E-5	10673
4	8.868E-5	11277
5	7.761E-5	12885
6	6.691E-5	14945
7	5.497E-5	18191
8	4.523E-5	22108
9	3.456E-5	28934
10	2.477E-5	40367

(b) 피로수명의 Text 형태

Surface finish	Factor	Life (Repeats)
Polished	1	9618
Ground	0.9124	6730
Good Machined	0.8449	5132
Average Machined	0.7774	3918
Poor Machined	0.7249	3176
Hot rolled	0.6318	2184
Forged	0.4718	1115
Cast	0.4964	1041
Water corroded	0.5146	1341
Seawater corroded	0.3803	666
User defined	0.4718	1115
Unchanged	1	9618

(c) 표면 후처리 조건에 따른 피로특성



(d) 하중이력 크기 변화에 따른 피로특성

Fig. 2 피로수명의 결과형태 및 피로특성의 민감도 해석결과

로세스를 요약하면, 대상물에 대한 구조해석을 수행하여 단위 하중에 의하여 생성된 응력텐서(Stress Tensor)에 작용 하중이력을 곱하여 반응 응력이력(Response Stress Time History)을 구한 후, 이를 사이클카운팅(Cycle Counting)하여 응력진폭(Stress Amplitude)과 평균응력(Mean Stress)을 구한다. 이후에는 모재의 S-N Curve를 참조하여 Miner's Rule에 작용 응력범위의 횟수와 모재의 특성곡선의 데이터를 입력하여 누적피로손상(Cumulative Fatigue Damage)을 산출하고 이로부터 피로수명을 구하는 것이다. Fig. 3에는 S-N Curve와 피로수명 분포를 한 예로서 나타내었다.

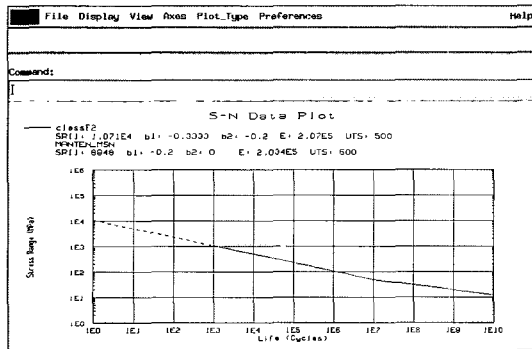
3.2 Strain Life(Crack Initiation) Approach

구조해석으로부터 산출된 변형율을 이용하여 Engineering Crack(보통 2mm내외)이 생성될 때의

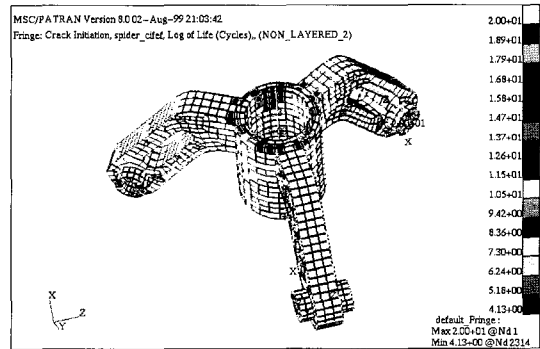
피로수명을 예측하는 방법이다. 본 방법은 박판과 같은 소성 영역이 존재하는 구조물의 내구해석에 적합하며 기본적으로 Manson-Coffin Method를 채택하며 주로 저 되풀이수 피로(Low Cycle Fatigue) 영역에 적용되는 특징이 있다. 본 방법의 적용 사례 중 Rubber Belt와 Mounting Bracket의 피로수명 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 Crack Growth(Damage Tolerance) Approach

선형탄성 파괴역학(LEFM)을 바탕으로 하여 손상허용설계의 개념으로 설계된 선박, 항공기 등의 초기균열을 갖는 구조물의 균열진전 해석을 수행하며, Paris Law를 기본적으로 채택하고 있다. 기하학적 형상을 고려한 수정 함수인 Compliance Function을 정의할 수 있는 'PKSOL'이란 기능이

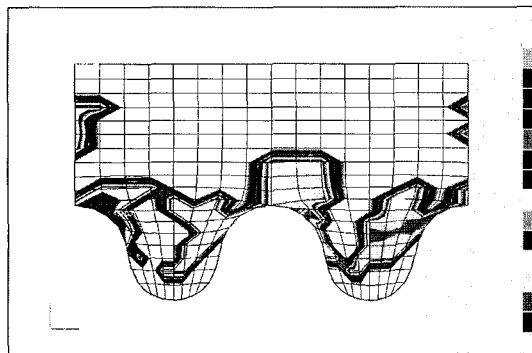


(a)

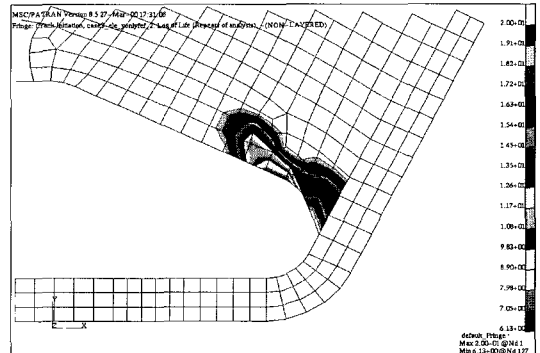


(b)

Fig. 3 S-N Curve, 피로수명 분포



(a)



(b)

Fig. 4 Rubber Belt & Mounting Bracket의 피로수명 분포

본 방법에 첨부되어 있으며, 구조물의 초기균열이 반복되는 부하하중에 의하여 어느 방향으로 얼마만큼 진전하는가를 예측하는 내용이다. Compliance Function의 한 예와 산출된 결과 중 하나인 a-N Curve를 Fig. 5에 나타내었다.

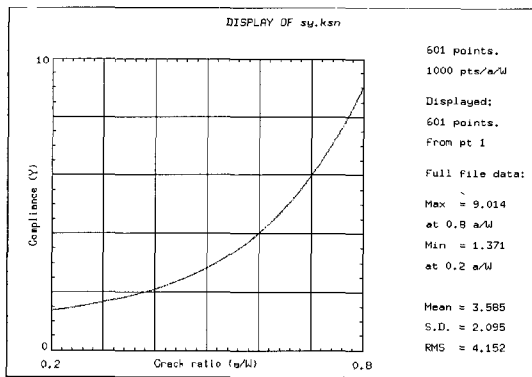
3.4 Vibration Fatigue Approach

본 방법은 대상물의 고유진동(Natural Frequency)에 따른 동적 특성(Dynamic Effect)을 고려하여 취약부위와 피로수명 등을 예측하는 방법이다. 구조해석의 Normal Mode와 Frequency Response Analysis를 먼저 수행한 후, 작용 하중이력을 Frequency Domain의 Power Spectral Density 형태로 입력하여 산출된 Response PSD를 Dirlik Solution등의 방법을 적용시켜 PDF(Probability Density Func-

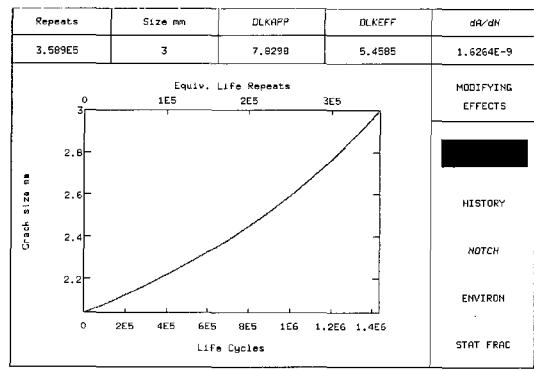
tions)로 변환시켜 최종적으로는 구조물의 S-N 곡선으로부터 피로수명을 산출하는 방법으로 공진피로(Resonance Fatigue) 해석을 지원하는 내용이다. Fig. 6에 시간형태의 하중이력을 주파수형태의 PSD로 변환한 결과와 본 방법을 적용하여 산출한 피로수명 분포를 나타내었다.

3.5 Multiple Fatigue Approach

대부분의 구조물은 단축(Uniaxial) 하중이 아닌 다하중(Multiaxial)의 영향을 받으며, 이 경우에는 하중간의 간섭을 고려한 해석방법이 필요하다. 본 방법은 복수의 하중이력이 작용하는 경우에 적합한 것으로 시간대별로 작용하는 모든 하중을 조합한 상태에서 대상 응력이나 변형율을 산출하여 피로수명을 예측하는 방법이다. 차량 차체 구조물에

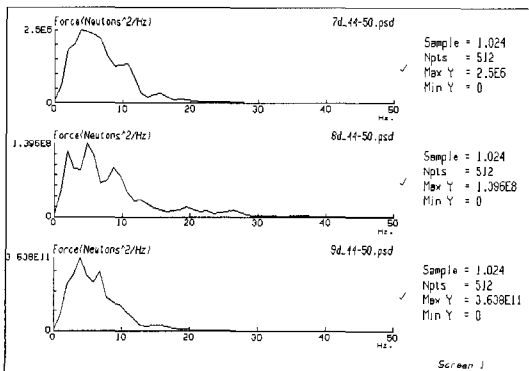


(a)

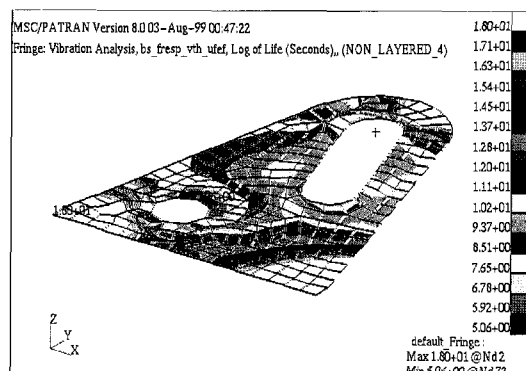


(b)

Fig. 5 Compliance Function & a - N Curve

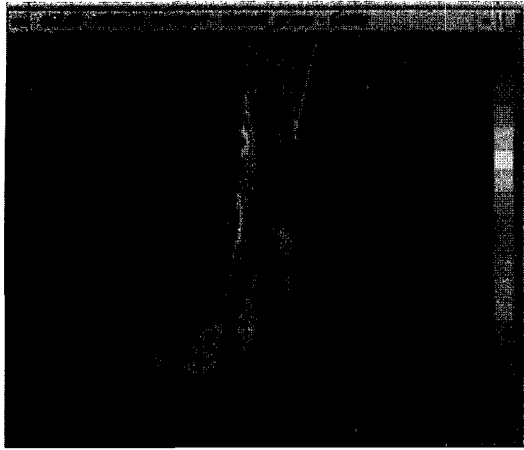


(a)



(b)

Fig. 6 Frequency Domain의 PSD & 피로수명 분포

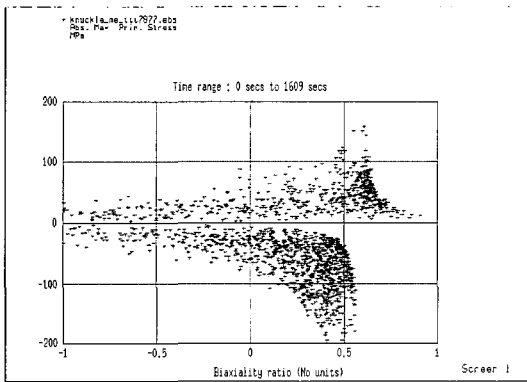


(a)

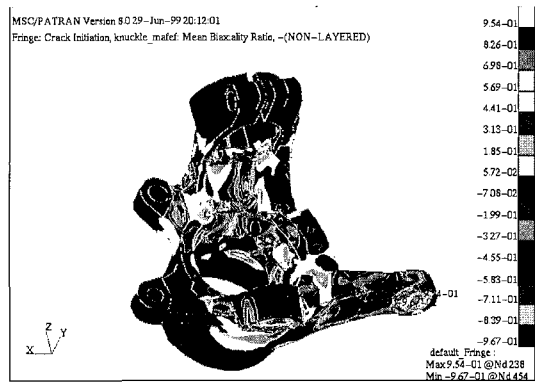


(b)

Fig. 7 피로손상의 분포와 실차 내구시험의 결과비교



(a)



(b)

Fig. 8 Stress의 Biaxiality Ratio & 피로수명 분포

본 방법을 적용하여 산출한 피로손상 분포와 실차 시험에서 산출된 균열발생 위치를 비교하여 아래 Fig. 7에 나타내었다.

3.6 Multiaxial Fatigue Approach

다축 피로해석은 먼저 Stress Life 혹은 Strain Life Approach를 적용한 내구해석을 수행한 후, 이를 바탕으로 산출된 Biaxiality Ratio, Angle Spread 등의 Parameter로부터 다축성(Multiaxiality)을 평가하여 Non-Proportional Loading 상태에 대해서는 Critical Plane Method를 적용한 전체 8가지의 고유 피로수명식(Wang-Brown etc.)을 적용하는 방법이다. 즉 하중이력의 각 작용점에 따른 요소의

응력상태(Stress Status)와 작용하는 주응력 방향을 고려한 피로수명을 예측하는 프로세스이다. 아래 Fig. 8에는 하중이력 작용에 따른 응력상태의 비율과 본 방법을 적용하여 산출한 해석 결과이다.

3.7 Spot Weld Fatigue Approach

구조물의 점용접 부위들의 피로수명 분포, 용접된 Sheets과 Nugget에 대하여 0~360 Degrees를 10 Degree 간격으로 피로손상 등을 산출하여 Polar Plot 등으로 나타내는 방법이다. 이 경우에는 유한요소 모델상에서 Nugget를 Simple Beam 요소로 처리하여 Force Transducer의 기능을 갖게 하고, 기본적으로 Rupp-Storz-Grubisic Method

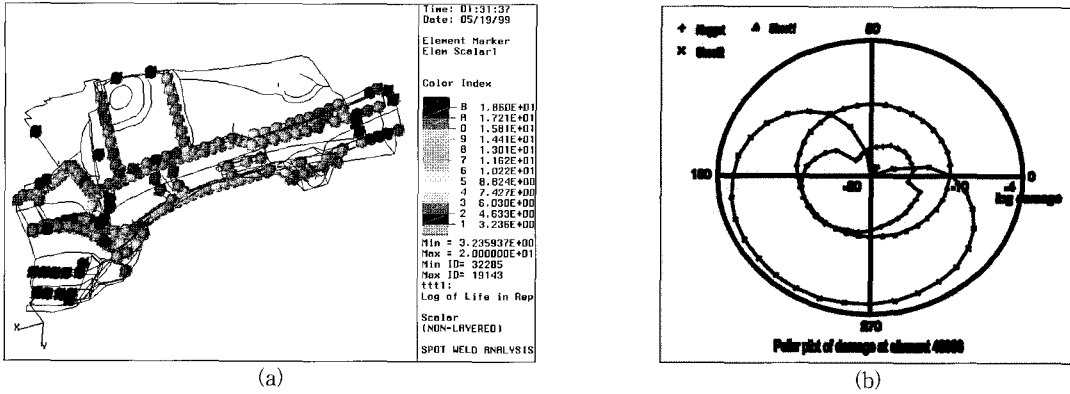


Fig. 9 점용접의 피로수명 분포와 피로손상의 Polar Plot

를 채택하여 점용접 부위에 생성되는 응력을 등가 응력으로 변환시켜 이를 피로수명 식에 대입한다. 이 외에도 Sheets의 두께 및 Nugget 직경 변화에 따른 피로특성 민감도 해석을 지원 하는 기능 등이 있다. 자체의 점용접 부위에 대한 피로수명 분포와 피로손상의 Polar Plot의 한 예를 Fig. 9에 나타내었다.

3.8 Seam Weld Fatigue Approach

본 방법은 연속 형태로 용접된 심용접 부위에 대한 내구해석을 수행하는 것으로, Fig. 10과 같이 심용접 부위중에서 가장 취약한 부위와 각 위치별 피로수명을 산출하는 기능이 있다. 해석의 프로세스는 심용접부의 위,아래에 형성된 용접비드(Welding Bead)를 3D 요소로 모델링하여 각 용접라인에서

형성된 응력을 등가응력으로 산출하여 용접재의 S-N Curve를 이용하여 피로수명을 산출하는 것이다.

3.9 Wheel Fatigue Approach

회전체에 대한 내구해석 수행에는 종래의 방법보다도 회전상태를 고려한 응력을 적용하는 것이 더욱 효과적이다. 본 방법은 구조물이 회전하면서 받는 각기 다른 하중상태를 고려하여 피로수명을 예측하는 방법이며, Fig. 11에 가장 대표적인 회전 구조물의 피로수명 분포를 나타내었다.

이상 설명한 피로내구해석의 솔버 종류이외에도 하중이력 추출 및 신호처리, 다양한 해석과 결과의 분석을 지원하기 위한 두 가지의 유효한 기능이 있다.

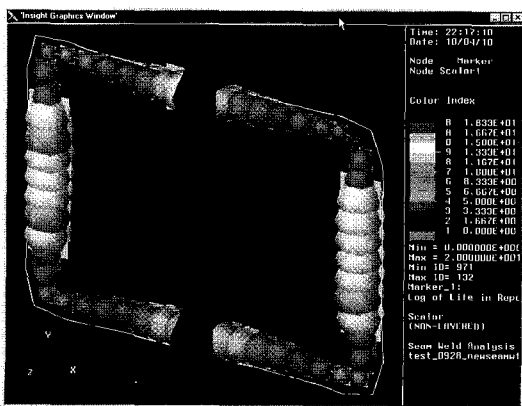


Fig. 10 심용접 내구해석의 피로수명 분포

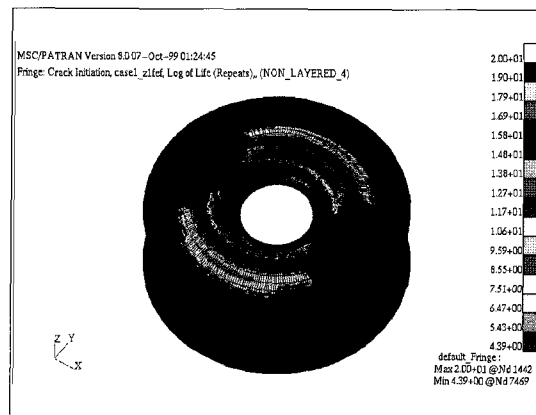


Fig. 11 휠 내구해석의 피로수명 분포

3.10 Software StrainGauge

Hardware StrainGauge 기능을 FE-Based로 전환 시킨 기능으로서 하중이력을 얻고자 하는 부위의 데이터가 없거나 본 기능으로부터 산출된 데이터의 분석측면에도 활용되는 기능이다. 측정 Signal 과 예측 Signal의 Correlation을 실시한 후, 구조물에 Hardware StrainGauge를 부착할 수 없는 위치 (용접 비드부위, 노치부위 등)에서 하중이력을 산출할 경우에 사용할 수 있다. Fig. 12에 Strain Gauge의 생성형태와 하중이력의 분할 예를 나타내었다.

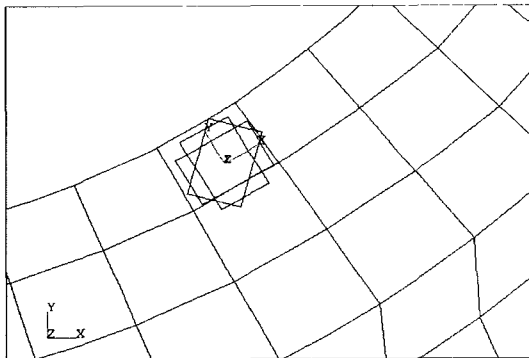
3.11 Utilities

하중이력에 대한 신호처리(Signal Processing)와 해석결과에 대한 다양한 분석 방법을 지원하는 기능들로 구성되어 있다. 즉 하중이력에 대한 사칙연산,

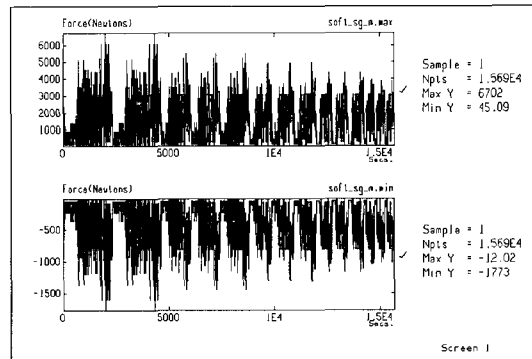
구간의 변환 등이 지원되며, Fig. 13에 나타낸 바와 같이 Filtering 기능 및 시간 진행에 따른 누적피로손상의 변환 과정 등도 손쉽게 처리할 수 있다.

4. 적용분야 및 적용사례

피로내구해석은 현재 여러 산업분야의 다양한 구조물과 부품에 적용되고 있으며, 과거의 가장 중요한 결과인 취약부위 예측과 피로수명 산출 이외에 근래에는 여러 환경인자 변경에 따른 피로특성의 파악 및 분석, 동력학과의 접목분야에 더욱 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 프로그램을 적용한 여러 적용사례가 있으나, 여기에서는 지면부족으로 3장의 피로내구해석의 종류를 설명할 때 각 해석종류별의 적용사례를 참조하시고, 보다 많은 사례가 필요하신 분은 당사의 홈페이지를 참조하기 바란다.

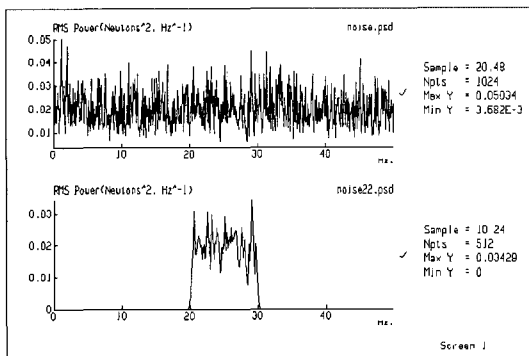


(a)

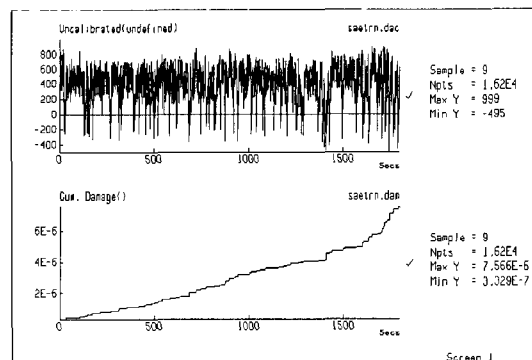


(b)

Fig. 12 Software StrainGauge의 생성형태와 하중이력의 Positive, Negative 분할 형태




(a)



(b)

Fig. 13 하중이력에 대한 Filtering 형태와 누적피로손상의 변화과정 Display 형태

5. 기술지원

당사는 MSC의 한국지사로서 MSC.Fatigue의 판매 및 기술지원을 담당하고 있다. 본 프로그램에 대해서는 1년에 5회의 정기교육을 실시하고 있으며, 경우에 따라서는 방문교육도 수행하고 있다. 상세한 교육일정과 내용은 당사 홈페이지(www.mscsoftware.co.kr)를 참조하기 바란다. 또한 당사는 1997년부터 피로내구에 관련된 기술용역을 수행하고 있기에 이 분야에 관심이 있으신 분은 아래 담당자에게 문의하기를 바라며, 본 프로그램은 개인용 PC로부터 Super Computer까지 지원된다. 

한국엠에스씨(주)

서울사무실 : 경기도 성남시 분당구 서현동 267-2
국민카드빌딩 2층

Tel : 031-708-6424, Fax : 031-708-6425

부산사무실 : 부산시 금정구 남산동 24-13
수광빌딩 701호

Tel : 051-517-6025, Fax : 051-517-6028

E-mail : jglee@mscsoftware.co.kr