



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2008년01월29일
(11) 등록번호 10-0799207
(24) 등록일자 2008년01월23일

(51) Int. Cl.

G01N 3/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2001-0088286

(22) 출원일자 2001년12월29일

심사청구일자 2006년11월20일

(65) 공개번호 10-2003-0059425

(43) 공개일자 2003년07월10일

(56) 선행기술조사문헌

JP07055668 A

JP11030576 A

JP63019533 A

KR1019990055060 A

전체 청구항 수 : 총 2 항

(73) 특허권자

삼성테크윈 주식회사

경남 창원시 성주동 28번지

(72) 발명자

김지희

경상남도창원시성주동28번지

(74) 대리인

리엔목특허법인 이해영

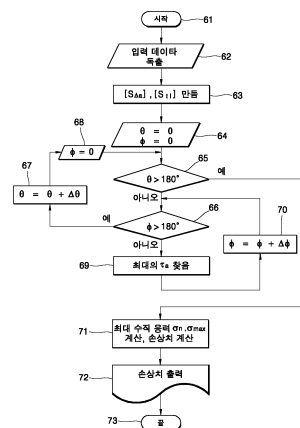
심사관 : 조병도

(54) 고주기 피로 수명 해석 방법

(57) 요약

본 발명에 따르면, 다축 응력 상태하에 있는 구조물에 대한 변동 응력 진폭 텐서와, 전체 응력 텐서($S_{\Delta a}$, S_{ti})를 만드는 단계, 구조물의 최대 전단 응력 진폭이 나타나는 임계 평면에서의 전단 응력 진폭을 구하기 위하여, 임계 평면에 대한 벡터를 한정하는 각도(θ , ϕ)를 소정의 증분($\Delta\theta$, $\Delta\phi$)으로 증가시켜 가면서 임의의 평면에 전단 응력 진폭을 반복적으로 계산함으로써, 최대의 전단 응력 진폭(τ_a)을 구하는 단계, 상기의 임계 평면에서의 최대 수직 응력($\sigma_{n,max}$)을 계산하는 단계 및, 상기의 최대 수직 응력을 다축 응력 상태의 고주기 피로 판정식에 대입하여 피로 파괴 가능성을 판정하는 단계를 구비하는 고주기 피로 수명 해석 방법이 제공된다.

대표도 - 도6



특허청구의 범위

청구항 1

다축 응력 상태하에 있는 구조물에 대한 변동 응력 진폭 텐서와, 전체 응력 텐서(S_k, S_{ti})를 만드는 단계,

구조물의 최대 전단 응력 진폭이 나타나는 임계 평면에서의 전단 응력 진폭을 구하기 위하여, 임계 평면에 대한 벡터를 한정하는 각도(θ, ϕ)를 소정의 증분($\Delta\theta, \Delta\phi$)으로 증가시켜 가면서 임의의 평면에 전단 응력 진폭을 반복적으로 계산함으로써, 최대의 전단 응력 진폭(τ)을 구하는 단계,

상기의 임계 평면에서의 최대 수직 응력($\sigma_{n,max}$)을 계산하는 단계 및,

상기의 최대 수직 응력을 다축 응력 상태의 고주기 피로 판정식에 대입하여 피로 파괴 가능성을 판정하는 단계를 구비하는 고주기 피로 수명 해석 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 고주기 피로 판정식은 $((4 \sigma_u - \sigma_e) / 4 \sigma_e \sigma_u) \cdot \tau_a + \sigma_{n,max} / 2 \sigma_u = K_{ih}$ 이며, 여기에서 σ_u 는 최대 인장 강도, σ_e 는 굽힘 피로 한계이고, K_{ih} 의 값이 1 보다 크면 피로 파괴가 발생할 가능성이 있고, 1 보다 작으면 피로 파괴가 발생할 가능성이 거의 없는 것으로 판단하는 것을 특징으로 하는 고주기 피로 수명 해석 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

- <7> 본 발명은 고주기 피로 수명 해석 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 가스 터빈 엔진 부품과 같이 다축 응력 상태하에 있는 구조체에 대하여 임계 평면 접근 방법으로 고주기 피로 수명을 해석하는 방법에 관한 것이다.
- <8> 통상적으로 피로 파괴란 모든 구조체가 정하중하에서 충분한 강도를 가지고 있더라도 반복 하중 또는 교번 하중을 받게되면 그 하중이 비록 작더라도 마침내 파괴를 일으키는 현상을 말한다. 즉, 반복 응력이나 반복 변형을 받는 이러한 현상을 피로라고 하고, 그에 의한 구조체의 파괴를 피로 파괴라고 한다. 구조체는 정하중보다 훨씬 작은 하중만으로도 반복 응력 또는 반복 변형에 의해서 파괴된다는 점은 공지되어 있다.
- <9> 고주기 피로 파괴는 이론적으로 소성을 넘지 않는 비교적 낮은 응력 수준에서 균열이 생성, 진전하여 구성품을 파괴시킨다. 통상적으로 10^5 주기를 경계로 저주기 피로(low cycle fatigue)와 고주기 피로(high cycle fatigue)로 구별하는데, 이는 설계 및, 해석상의 편의를 위한 구분이다. 보통 고주기 피로는 재질 내부에서 균열의 생성에 시간을 필요로 하므로 미소 균열의 생성에 대한 저항성이 중요하고 저주기 피로는 균열의 진전에 시간을 필요로 하므로 고 응력장 해소에 용이한 연한 재질이 유리하다. 그러므로 고주기 피로에 의한 피로 파괴는 큰 균열의 생성과 동시에 파단이 발생한다. 피로 파괴 현상은 세 단계로 구분될 수 있는데, 첫째 균열 생성 단계, 둘째 균열 성장 단계 및, 셋째 최종 파단에 이르는 단계로 구분할 수 있다.
- <10> 가스 터빈 엔진의 모든 구성품은 부품에 따라서 다축 응력 상태 또는 단축 응력 상태에 놓이게 된다. 예를 들면 피로 파괴 가능성이 가장 높은 블레이드는 단축 응력 상태에 있으므로 그 피로 수명을 해석하는 것은 상대적으로 용이하다. 이에 반하여, 다른 대부분의 부품들은 다축 응력 상태에 놓일 가능성이 많은데, 예를 들면 축과 같은 부품은 비틀림 진동과 굽힘에 의한 응력 상태를 가진다.
- <11> 다축 응력 상태하의 구성품에 대한 고주기 피로 평가 방법은 두가지로 나누어볼 수 있는데, 등가응력 접근 방법과 임계 평면 접근 방법으로 구분된다. 등가 응력 접근 방법은 다축 상태의 응력을 스칼라량의 등가 응력으로 계산하여 기존의 단축 고주기 피로 평가 방법에 적용하는 방법이다. 그러나 등가 응력을 이용하여 다축 응력 상태의 고주기 피로 수명 해석을 하는 경우에는 구성품 내부의 다축 상태에 따라서 구성품이 입는 손상의 차이를

고려해주지 못하고 미세한 고주기 피로 파괴 현상을 묘사할 수 없다는 문제점이 있다. 특히, 터빈 샤프트와 같이 축 하중에 의한 평균 응력과 함께 비틀림 진동이 예상되는 구성품에 대해서는 다축 응력 상태가 크므로 고주기 피로 수명을 정확하게 예측하는 것은 사실상 불가능하다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

- <12> 본 발명은 위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 목적은 고주기 피로 상태하의 피로 수명을 해석하는 방법을 제공하는 것이다.
- <13> 본 발명의 다른 목적은 임계 평면 접근 방법을 사용하여 고주기 피로 상태하의 피로 수명을 해석하는 방법을 제공하는 것이다.

발명의 구성 및 작용

- <14> 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명에 따르면, 다축 응력 상태하에 있는 구조물에 대한 변동 응력 진폭 텐서와, 전체 응력 텐서($S_{\Delta a}$, S_{ti})를 만드는 단계, 구조물의 최대 전단 응력 진폭이 나타나는 임계 평면에서의 전단 응력 진폭을 구하기 위하여, 임계 평면에 대한 벡터를 한정하는 각도(θ , ϕ)를 소정의 증분($\Delta\theta$, $\Delta\phi$)으로 증가시켜 가면서 임의의 평면에 전단 응력 진폭을 반복적으로 계산함으로써, 최대의 전단 응력 진폭(τ_a)을 구하는 단계, 상기의 임계 평면에서의 최대 수직 응력($\sigma_{n,max}$)을 계산하는 단계 및, 상기의 최대 수직 응력을 다축 응력 상태의 고주기 피로 판정식에 대입하여 피로 파괴 가능성을 판정하는 단계를 구비하는 고주기 피로 수명 해석 방법이 제공된다.
- <15> 본 발명의 일 특징에 따르면, 상기 고주기 피로 판정식은 $((4 \sigma_u - \sigma_e)/4 \sigma_e \sigma_u) \cdot \tau_a + \sigma_{n,max} / 2 \sigma_u = K_{ih}$ 이며, 여기에서 σ_u 는 최대 인장 강도, σ_e 는 굽힘 피로 한계이고, K_{ih} 의 값이 1 보다 크면 피로 파괴가 발생할 가능성이 있고, 1 보다 작으면 피로 파괴가 발생할 가능성이 거의 없는 것으로 판단한다.
- <16> 이하, 본 발명을 첨부된 도면에 도시된 바를 참고로 보다 상세하게 설명하기로 한다. 본 발명은 가스 터빈 엔진의 부품에 대하여 설명될 것이지만, 다른 제품의 부품에 대해서도 유사한 해석 방법이 적용될 수 있다는 점이 이해되어야 한다.
- <17> 본 발명에 따라서, 임계평면 접근 방법을 적용하려면 부품의 미시적인 관점에서 방향에 따라 응력 및, 변형률의 성분이 바뀌게 되고, 그에 따라서 재료가 받는 손상의 정도가 달라지게 되므로 가장 크게 손상을 받는 면에서 파단이 발생한다고 가정하기로 한다. 부품의 각각의 절점에서의 손상을 계산하려면 다축 응력 상태의 피로 판정식이 필요하다. 맥디아미드 디.엘.이 저술한 "고주기 다축 피로 파괴, 피로 절단, 공학 재료 구조에 대한 일반적인 기준" 제하의 참고 도서를 참조하면, 여러가지 이축 응력 상태하의 시험 결과에 있어서 임계 평면(critical plane)에서의 전단 응력 진폭과 최대 인장 강도와 임계 평면에서의 최대 인장 응력과의 비로써 다음의 식(1)이 성립된다는 점이 공지되어 있다.
- <18> $C_1 \cdot \tau_a + C_2 \cdot (\sigma_{n,max} / \sigma_u) = 1$
- <19> 여기에서 τ_a 는 전단 응력의 진폭, $\sigma_{n,max}$ 는 최대 수직 응력, σ_u 는 최대 인장 강도이다.
- <20> 한편, 상기 참고 문헌에는 여러가지 탄소강과 니켈 크롬 합금에 대한 실험적 결과가 그래프로서 표시되어 있는데, 이는 첨부된 도 1 과 같다. 즉, 도면에 도시된 바로부터 알 수 있는 것으로서, 최대 수직 응력($\sigma_{n,max}$)이 2.0 일때 전단 응력 진폭(τ_a)은 0 이 되고, 반대로 전단 응력 진폭(τ_a)이 1.0 일때 최대 수직 응력($\sigma_{n,max}$)은 0 이 된다.
- <21> 위의 참고 문헌에서는 비틀림에 의해 파단되는 경우를 이용하여 각 계수들을 구하였다. 가스 터빈 엔진의 경우는 굽힘에 의한 고주기 피로 파괴가 일어나는 경우가 많으므로 굽힘의 경우를 이용하여 각각의 계수들을 구한다.
- <22> 도 2 에 도시된 것은 굽힘에 의한 인장 하중을 받는 미소한 크기의 환형 봉이다. 통상적으로 균열의 생성은 최대 전단 응력이 발생하는 면에서 나타나므로 임계 평면(critical plane)을 최대 전단 응력 진폭을 나타내는 면으로 설정하다. 고주기 피로에 의한 구성품 수명은 균열의 생성 시간이 대부분의 수명을 차지한다는 가정하에 유도될 수 있다.

- <23> 도 2 에서 최대 전단 응력은 시편의 표면에서 45 도 기울어진 면에서 나타나므로, 모아원(Mohr's circle)에서 표현되듯이 응력은 45 도의 면에서 최대 전단 응력이 $0.5 \sigma_e$ 이고, 최대 전단 응력 진폭은 전단 응력의 2 배이므로 σ_e 이다. 그리고 45 도 면에 나타나는 최대 수직 응력은 $0.5 \sigma_e$ 이다. 즉, $\tau_a = \sigma_e$ 이고, $\sigma_{n,max} = 0.5 \sigma_e$ 이다.
- <24> 이러한 값들을 상기 식(1)에 대입하면 다음의 식(2)과 같다.
- <25> $C_1 \cdot \sigma_e + C_2 \cdot (\sigma_e / 2 \cdot \sigma_u) = 1$
- <26> 여기에서 σ_e 는 굽힘 피로 한계를 표시한다.
- <27> 위 식(2)에는 두개의 미지수가 있으므로 미지수를 구하기 위해서 하나의 방정식이 더 필요하다. 도 1 로부터 알 수 있는 바와 같이, 참고 문헌에서 실험적으로 얻어진 임계 평면(critical plane)에서의 최대 전단 응력 진폭이 0 으로 접근할때 최대 수직 응력은 $2 \sigma_u$ 에 접하므로, 이 내용을 상기 식(1)에 대입하면 C_2 는 1/2 임을 알 수 있다.
- <28> 마찬가지로, C_2 를 위의 식(2)에 대입하여 C_1 에 대해서 풀면 C_1 은 다음의 식(3)과 같다.
- <29> $C_1 = (4 \sigma_u - \sigma_e) / 4 \sigma_e \sigma_u$
- <30> 여기에서 σ_u 는 최대 인장 강도, σ_e 는 굽힘 피로 한계를 나타낸다.
- <31> 위와 같은 구한 계수 C_1 및, C_2 의 값을 식(1)에 대입하면 최종적으로 다음과 같은 다축 응력 상태하의 고주기 피로 판정을 위한 식(4)을 얻게 된다.
- <32> $((4 \sigma_u - \sigma_e) / 4 \sigma_e \sigma_u) \cdot \tau_a + \sigma_{n,max} / (2 \sigma_u) = K_{ih}$
- <33> 여기에서 K_{ih} 는 다축 응력 상태의 고주기 피로 판정식으로서, 이러한 값이 1 보다 크면 피로 파괴가 발생할 가능성이 있고, 1 보다 작으면 피로 파괴가 발생할 가능성이 거의 없는 것으로 간주하여 무한 수명을 가질 수 있다.
- <34> 위와 같은 다축 응력 상태의 고주기 피로 방정식을 이용하여 구성품의 각각의 위치에서 손상을 계산하게 된다. 식(4)를 이용하여 고주기 피로 손상을 계산할때 현재는 임계 평면을 최대 전단 응력이 발생하는 평면으로 설정하고, 평균 응력 효과는 임계 평면에 작용하는 최대 인장 응력으로써 가해하도록 되어 있다.
- <35> 다음은 구성품에 하중이 작용하여 응력장이 존재할때 임의의 임계 평면에서의 전단 응력 진폭과 최대 인장 응력을 계산하고 실제의 구성품의 고주기 피로 손상을 평가하는 방법을 설명하기로 한다. 구성품이 고주기 피로 손상을 받기 위해서는 어떤 형식으로든지 도 3 에 도시된 바와 가른 정현파 형태의 응력을 받게 된다.
- <36> 도 3 에서 보는 바와 같이 응력의 절점을 이루는 두 점(①②)의 위상 차이는 180° 가 된다. 두 점에서의 응력 성분 차이를 손상 계산시에 응력 진폭으로 볼 수 있다.
- <37> 위에 정의된 응력 차이를 이용하여 각각의 임계 평면에서의 최대 전단 응력 진폭을 계산하게 된다. 도 3 에서 ① 점에서의 응력 텐서(stress tensor), ② 점에서의 응력 텐서는 다음의 행렬식(5,6)과 같이 정의된다.

<38>
$$S_{a1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx,1} & \sigma_{xy,1} & \sigma_{xz,1} \\ & \sigma_{yy,1} & \sigma_{yz,1} \\ & & \sigma_{zz,1} \end{bmatrix}$$

$$S_{\Delta a} = S_{a1} - S_{a2} = \begin{bmatrix} \Delta \sigma_{xx} & \Delta \sigma_{xy} & \Delta \sigma_{xz} \\ & \Delta \sigma_{yy} & \Delta \sigma_{yz} \\ sym. & & \Delta \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

<39>

<40> 한편, 각 변동 응력 진폭 성분은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \sigma_{xx} = \sigma_{xx,1} - \sigma_{xx,2}, \quad \Delta \sigma_{xy} = \sigma_{xy,1} - \sigma_{xy,2}$$

$$\Delta \sigma_{yy} = \sigma_{yy,1} - \sigma_{yy,2}, \quad \Delta \sigma_{yz} = \sigma_{yz,1} - \sigma_{yz,2}$$

$$\Delta \sigma_{zz} = \sigma_{zz,1} - \sigma_{zz,2}, \quad \Delta \sigma_{zx} = \sigma_{zx,1} - \sigma_{zx,2}$$

<44> 여기에서, S_{ai} ($i=1,2$) 는 변동 응력 텐서, $S_{\Delta a}$ 는 변동 응력 진폭 텐서, $\Delta \sigma_{ij}$ ($i,j=x,y,z$) 는 변동 응력 진폭 성분, $\sigma_{i,j,k}$ ($i,j=x,y,z$) ($k=1,2$) 는 변동 응력 성분이다.

<45> 다음은 앞에서 정의된 변동 응력 성분을 이용하여 임계 평면에서의 최대 전단응력 성분을 계산하게 된다. 즉,

$$\Delta \sigma_{xx}, \Delta \sigma_{xy}, \Delta \sigma_{yy}, \Delta \sigma_{yz}, \Delta \sigma_{zz}, \Delta \sigma_{zx} \Rightarrow \tau_a \text{ 이다.}$$

<47> 공간상의 임의의 평면에 작용하는 변형률 및, 응력 벡터를 계산하기 위하여 도 6 에 도시된 미소 임계 평면에 작용하는 응력 성분에서 3 차원 공간상에서의 임의의 수직 벡터 $\vec{n}$ 과 이에 수직한 평면을 가정할 수 있다. 이 평면에 수직한 방향의 수직 응력 성분은 다음의 식(7)과 같이 계산된다.

$$\vec{\sigma}_n = (\vec{n} \cdot S_{\Delta a} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}$$

<48>

<49> 여기에서 $\vec{\sigma}_n$ 은 수직 응력 벡터, $\vec{n}$ 은 수직 벡터, $S_{\Delta a}$ 는 변동 응력 진폭 텐서이다.

<50> 그리고, 같은 평면에서 작용하는 전단 응력 진폭은 다음의 식(8)과 같이 계산된다.

$$\tau_a = S_{\Delta a} \cdot \vec{n} - (\vec{n} \cdot S_{\Delta a} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}$$

<51>

<52> 여기서 $\vec{\sigma}_n$ 은 수직 응력 벡터, $\vec{n}$ 은 수직 벡터, $S_{\Delta a}$ 는 변동 응력 진폭 텐서이고 τ_a 는 전단응력 진폭이다.

<53> 최대 전단 응력 진폭이 나타나는 면을 임계 평면으로 정의했으므로 수직 벡터 $\vec{n}$ 을 3 차원 공간상에서 미리 정의한 수만큼을 투사하여 시행 착오 법에 의해 최대 전단 응력 진폭 면을 찾는다. 이와 같이 임계 평면을 찾은 후에는 그 면에서의 최대 수직 응력을 계산하기 위하여 도 3 을 참고하여 설명한 ① 점과 ② 점에서의 총 응력 텐서를 정상 상태의 응력 텐서와 변동 응력 텐서를 합하여 얻게 된다. 다음의 식(9)은 총 응력 텐서를 구하는 식이다.

$$S_{t1} = S_s + S_{a1}$$

$$S_{t2} = S_s + S_{a2}$$

<56> 여기에서 S_{ai} ($i=1,2$) 는 응력 텐서를 나타내고, S_s 는 평균 응력 텐서를 나타내고, S_{ti} ($i = 1,2$) 는 전체 응력 텐서를 나타낸다.

- <57> 최대 수직 응력은 다음의 식(10)을 이용하여 계산된다.
- <58>
$$\sigma_{n,\max} = \max(\vec{n} \cdot S_{i1} \cdot \vec{n}, \vec{n} \cdot S_{i2} \cdot \vec{n})$$
- <59> 여기에서 $\sigma_{n,\max}$ 는 최대 수직 응력을 나타내고, $\vec{n}$ 은 수직 벡터를 나타내고, S_{i1} ($i=1,2$)는 전체 응력 텐서를 나타낸다.
- <60> 정상 상태 평균 응력 텐서(S_s)는 엔진의 100% 운전 속도에서의 결과를 유한 요소 해석 방법중의 비선형 정적 해석(nonlinear static analysis)을 이용하여 얻게 된다. 변동응력 텐서(S_a)는 유한 요소 해석의 선형 섭동 고유진동 모드 해석을 통하여 얻게 된다.
- <61> 도 5 에 도시된 것은 위에서 설명된 임계 평면 접근 방법에 의한 고주기 피로 수명 계산을 위한 개요도이다.
- <62> 도면을 참조하면, 계산 프로그램에 대하여 변동 응력 성분과 평균 응력 성분이 입력된다. 도면 번호 51 로 표시된 것은 도 3 에서 ① 점에서의 변동 응력 성분이고, 도면 번호 52 로 표시된 것은 도 3 에서 ② 점에서의 변동 응력 성분이다. 또한 도면 번호 53 은 정상 상태의 평균 응력 성분이다.
- <63> 한편 상기와 같은 입력 데이터에 의해 계산 프로그램(54)으로부터 출력되는 것은 손상치 출력 파일등이다. 즉, 도면 번호 55 로 표시된 것은 각 절점에서의 손상치 출력 파일이고, 도면 번호 56 으로 표시된 것은 각 절점에서의 손상치 파탄(PATRAN) 입력 파일이고, 도면 번호 57 로 표시된 것은 프로그램 계산중의 메시지 출력 파일을 의미한다.
- <64> 도 6 에 도시된 것은 임계 평면 접근 방법에 의한 고주기 피로 손상 계산 프로그램(도 5 의 도면 번호 54 로 표시됨)의 계산 절차를 나타낸 흐름도이다.
- <65> 도면을 참조하면, 프로그램이 시작되면 (단계 61), 입력 데이터를 독출하여(단계 62), 변동 응력 진폭 텐서와, 전체 응력 텐서($S_{\Delta a}$, S_{ti})를 만든다 (단계 63). 단계(63)는 위에서 설명된 식(6)과 식(9)에 의해서 만들어진다. 다음에 임계 평면에 대한 전단 응력 진폭을 찾게 된다. 즉, 도 4 에 도시된 바와 같이, 임계 평면에 대한 벡터를 정의하는 각도 θ 와 각도 ϕ 를 0 내지 180 도 범위내에서 변환시키면서 최대의 전단 응력 진폭을 찾게 된다. 보다 상세하게 설명하면, 각도 θ 와 ϕ 를 각각 0 으로 설정하고(단계 64), 다음에 각도 θ 를 180 도와 비교하고(단계 65), 그 각도가 180 도와 크지 않다면 다시 각도 ϕ 를 180 도와 비교하여(단계 66), 해당 각도가 180 도보다 크지 않다면 최대의 τ_a 를 찾게 된다 (단계 69). 다음에 각도 ϕ 를 소정의 증분(즉, $\Delta\phi$) 만큼 증가시키고(단계 70), 증가된 각도 ϕ 가 180 도 보다 크지 않을때까지 루틴을 계속하여 최대의 τ_a 를 찾게 된다(단계 69).
- <66> 한편, 상기 각도 ϕ 가 180 도보다 커지게 되면(단계 66), 각도 θ 를 소정의 증분(즉, $\Delta\theta$) 만큼 증가시키고(단계 67), 각도 ϕ 를 제로로 설정한 상태에서(단계 68), 각도 θ 가 180 도 보다 큰지 여부를 비교한다 (단계 65). 각도 θ 가 180 도보다 크지 않다면 다시 단계(66)으로 이동하여 각도 ϕ 가 180 보다 크지 않은지의 여부를 판단하게 되는데, 이때는 단계(68)에서 ϕ 를 제로로 설정해놓았으므로 다시 단계(69)로 이동하여 최대의 τ_a 를 찾게 된다.
- <67> 즉, 임계 평면에 대한 최대의 전단 응력 진폭(τ_a)을 찾기 위해서는 모든 평면에 대한 전단 응력 진폭을 각도 θ 및, 각도 ϕ 를 0 내지 180 도 범위 사이에서 소정의 증분으로 증가시키으로써 구하여, 그중 가장 큰 것을 찾아내는 것이다.
- <68> 이와 같이 최대의 전단 응력 진폭(τ_a)이 구해지면 다음에 최대 수직 응력($\sigma_{n,\max}$)과 그에 따른 손상치를 계산한다 (단계 71). 이러한 계산은 위에서 설명된 식(8)에 의해서 이루어진다. 다음에 손상치를 출력하고(단계 72), 프로그램 수행을 종료한다(단계 73). 이와 같이 구한 최대 수직 응력을 식(4)에 대입하여, 고주기 피로 파괴가 발생할 것인지를 판단하게 된다.

발명의 효과

- <69> 본 발명에 따른 고주기 피로 수명 해석 방법은 다축 응력 상태하에 있는 구조체에 대한 고주기 피로 수명을 보다 정확하게 예측할 수 있다는 장점이 있으므로, 가스 터빈 엔진을 비롯한 많은 장치의 개발에 매우 유용하다.

<70>

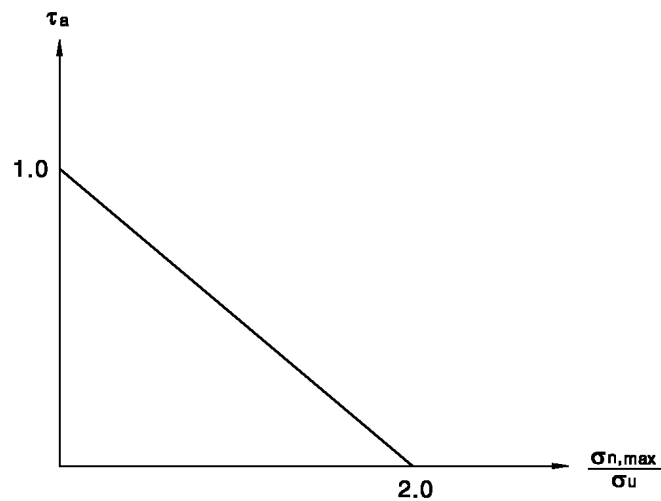
본 발명은 첨부된 도면에 도시된 예를 참고로 설명되었으나, 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자들은 이로부터 다양한 변형 및, 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 보호 범위는 첨부된 청구 범위에 의해서만 정해져야 할 것이다.

도면의 간단한 설명

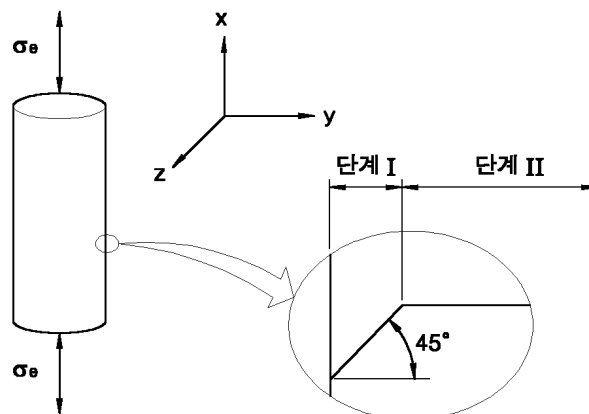
- <1> 도 1은 전단 응력 진폭과 최대 수직 응력 사이의 관계를 나타내는 그래프.
- <2> 도 2는 굽힘에 의한 인장 하중을 받는 미소한 크기의 환형 봉을 도시한 것이다.
- <3> 도 3은 시간에 따른 응력의 진동 상태를 도시하는 그래프.
- <4> 도 4는 구조물의 임계 평면에 대한 위치 벡터 및, 응력 벡터를 나타내는 좌표 시스템이다.
- <5> 도 5 는 본 발명에 따른 고주기 피로 수명 해석을 위한 프로그램에 대한 개요도.
- <6> 도 6 은 본 발명에 따른 고주기 피로 수명 해석을 위한 순서도.

도면

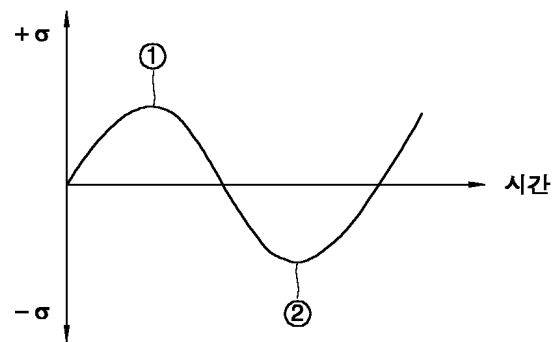
도면1



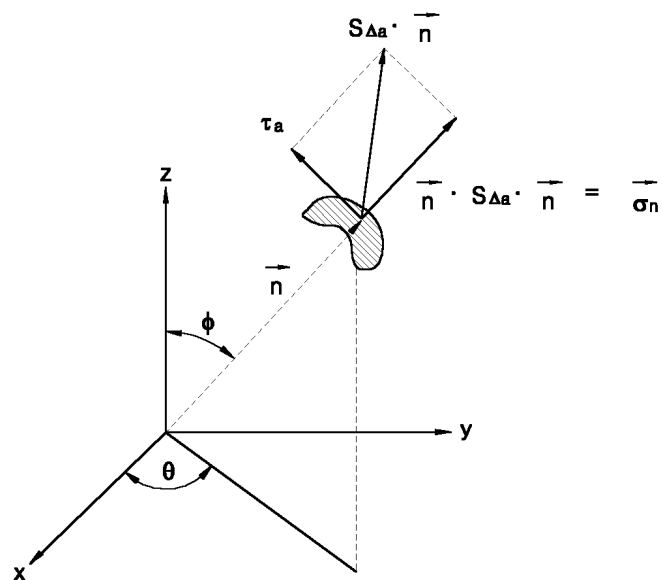
도면2



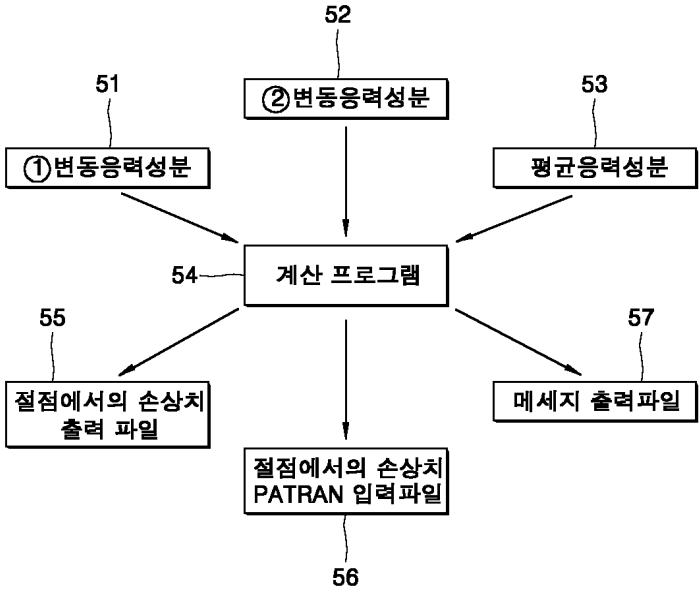
도면3



도면4



도면5



도면6

