

재료손상모델을 이용한 피로강도 평가 기법 개발

Development of an Fatigue Strength Assessment Methodologies Using Material Damage Model

서정관*, 이제명**, 백점기**, 강성원** , 허희영***

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원

** 부산대학교 조선해양공학과

*** 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

1. 서 론

피로강도평가는 해양구조물의 붕괴사고가 기하는 경제적, 사회적 파급효과를 감안할 때, 설계단계에서 가장주위를 기울여야하는 가장 필수적인 요소라 할 수 있다. 그리고 이러한 피로특성에 대한 정확한 평가를 위해서는, 대상구조물에 작용하는 하중이력이나 재료에 대한 정밀한 파악이 필요하다.

손상역학수법을 이용한 각종 강구조물의 손상 평가수법은 다양한 분야에서 많은 연구가 이루어져 있다. 그러나, 이러한 기술이나 이론들을 체계화시키고 실제 설계현장에서 사용할 수 있도록 하는 시스템 구축노력은 찾아보기 어렵다.

특히, 강재의 적용 혹은 강구조물의 설계에 필수적으로 검토되는 피로특성, 용접부와 관련된 강도문제 등에 대한 정확한 평가를 위해서는, 대상구조물에 작용하는 하중이력이나 재료응답거동에 대한 정밀한 파악이 필요하다. 하지만, 다양한 형태로 나타나는 피로현상과 용접에 의한 영향들을 매번 고려하면서 설계를 위한 예측활동을 수행한다는 것은 현실적으로 많은 무리가 따른다. 따라서 대부분의 피로문제에 있어서는 기존의 실험결과나 예측방법들을 바탕으로 피로특성평가를 하고 있는 것이 현실이다.

하지만, 최근의 조선소나 기계부품을 설계하는 현장에서 구조물의 형상변경 혹은 새로운 강재의 채용 등과 같은 문제에서 주요 이슈의 하나로서, 통합 설계 환경구축노력을 들 수 있다. 이는 미경험 설계활동에서 각종 강도평가시에 존재하는 다양한 불확실성과 재설계 혹은 사양변경 등으로

인한 불필요한 공수절감의 필요성이 지속적으로 증가하고 있게 때문이다. 이러한 이유로, 최근의 몇몇 연구에서는 다양한 형태·목적의 전문가시스템을 개발하여 설계지원을 손쉽게 하기 위한 시도를 하고 있다^[1]. 하지만 이들 연구의 대부분은, 파괴현상에 주안점을 두고 다루기보다는, 기존설계공식의 개량 등을 위주로 단순히 사용자편의성을 고려한 전문가시스템의 개발이 주요목표가 되고 있다.

본 연구에서는, 모든 종류의 파손문제의 가장 근본적인 원인이 되는 재료파괴현상을 모델링하는 기술을 확립하고, 이 기술을 바탕으로 각종 용접부 피로강도 및 파괴특성을 평가할 수 있는 피로강도평가 기법을 개발한다. 강도평가 기법은 전문가시스템화 하여, 수시로 설계변경이 요구되는 선박 및 해양구조물에 채용되는 강재 혹은 용접부를 대상으로 적용하여 활용가능성을 검토한다.

2. 재료의 손상모델의 정식화

반복되는 하중을 받을 때 기계구조물 부재의 사용중 손상을 평가하고 이러한 손상량을 기본으로 파괴현상을 예측하는 방법으로서, 연속체손상역학을 이용한 비선형 유한요소해석이 최근 주목받고 있다.

연속체손상역학 자체는 고체역학의 오랜 역사에 견주어 볼 때 비교적 짧은 역사를 지니고 있지만 최근 들어 각종 구조물의 손상관련 문제에서 적극적으로 채용되고 있는 기술이다. 특히, 가상공간에서의 균열발생 시뮬레이션등은 관련문제 예측에 필요한 비용의 절감효과와 안전성확보 설

개념도출을 위한 핵심기술로 평가되고 있다.

고려 가능한 모든 비선형거동을 예측하고자 하는 비선형 유한요소해석에 있어서 증분형 요소강성 방정식은 초기변형률법(Bathe, 1996)에 의해 다음과 같이 구해진다.^[2]

$$[k_o]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} + \{\Delta f_p\} + \{\Delta f_T\} + \{\Delta f_D\} \quad (1)$$

$$[k_o] = \int_V [B_o]^T [D_e] [B_o] dV \quad (2)$$

$$\{\Delta f_p\} = \int_V [B_o]^T [D_e] \{\Delta \epsilon^p\} dV \quad (3)$$

$$\{\Delta f_T\} = \int_V [B_o]^T [D_e] \{\Delta \epsilon^T\} dV \quad (4)$$

$$\{\Delta f_D\} = \int_V [B_o]^T \Delta D \{\bar{\sigma}\} dV \quad (5)$$

Eq. (5)에 대한 시간적분을 통하여 주어진 하중이력에서의 손상해석이 가능하게 된다. 위 식 중에 포함되는, 손상발전을 고려한 소성 변형률속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\{\sigma^d\}}{\sigma_{eq}} \quad (6)$$

여기서,

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\}^T \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} \right)^{1/2} = \left(\frac{\sigma_{eq} / (1-D) - R - k}{K} \right)^N \quad (7)$$

$$R = Q_1 p + Q_2 [1 - \exp(-bp)] \quad (8)$$

식 중에서, \dot{p} 는 누적 소성변형률 속도를 나타내며, 6개의 파라미터 K, N, k, Q1, Q2, b는 재료정수이다. 손상의 발전은 다음 식에 의해 표현된다.

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S} \right)^s \dot{p} \quad (9)$$

여기서, s 및 S는 손상발전에 관계하는 재료정수이며, 손상의 발전에 의해 개방된 변형률에너지 밀도에 해당되는 량 Y는 다음과 같이 정의된다.

$$-Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu)\sigma_{eq}^2 + 3(1-2\nu)\sigma_H^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

Eq. (8)에 의해 계산되는 손상증분에 대해 시간적분을 수행하여 일정수준에 도달하면 재료파괴가 발생한 것으로 평가한다.

단축 인장시험에 대하여 손상발전 방정식을 채용한 유한요소 해석을 수행하여 각 재료정수를 결정한다. 기준값으로 사용되는 재료정수의 결정은 Eq. (7),(8)과 유사한 의미를 갖는 Ramberg -

Osgood equation 모델에서 우선, 경화량의 크기와 관련된 재료정수는 다음과 Eq. (11)-(13) 같이 유도되어 결정할 수 있다.

$$K = \frac{\sigma_T}{\left(\epsilon_f - \frac{\sigma_T}{E} \right)^{1/N}} \quad (11)$$

$$\frac{1}{N} = \left(\frac{\epsilon_f - \sigma_T / E}{1 - E_s / E} \right) \left(\frac{E_s}{\sigma_T} \right) \quad (12)$$

여기서, $E_s = \frac{d\sigma(\epsilon_p)}{d\epsilon}$

$$k = 0.9 \sigma_Y, \quad Q_1 = 0.1 \sigma_Y, \quad Q_2 = \sigma_T - \sigma_Y, \quad b = -p \log \left(\frac{0.1 \sigma_Y p}{\sigma_T - \sigma_Y} \right) \quad (13)$$

3. 피로강도의 평가기법개발

Rabotnov(1969)에 의해, 크리프 손상문제를 다루기 위해 제안된 손상재료의 응력상태를 유효응력은 변형률 등가가설과 함께 손상역학에서 자주 이용되는 중요 개념이 되고, 손상변수를 고려한 유한요소정식화에 사용되는 원리이다. 이 원리에 따라서 변형률 등가 사실과 유효응력 개념을 이용하면 손상을 고려한 응력변화율벡터와 탄성변형율벡터의 관계는 다음식에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} \left\{ \dot{\sigma} \right\} &= (1-D) \left\{ \dot{\sigma} \right\} - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \\ &= (1-D) [D_e] \left\{ \left\{ \dot{\epsilon} \right\} - \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} \right\} - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \\ &= [D_e] \left\{ \dot{\epsilon}^e \right\} - \dot{D} \left\{ \bar{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\left\{ \dot{\epsilon} \right\}$, $\left\{ \dot{\epsilon}^p \right\}$ 그리고 $\left\{ \dot{\epsilon}^e \right\}$ 는 각각 전변형률속도, 소성변형률속도 그리고 탄성변형률속도이다. Eq. (1)-(5)의 손상평가용 알고리즘과 Eq. (6)-(14)로 나타낸 구성방정식을 채용한 유한요소 해석프로그램을 사용하였고 해석코드를 탑재한 전문가시스템의 개요를 Fig. 1에 나타낸다.

가장 쉽게 구할 수 있는 실험 결과인 단축 인장시험결과를 재료물성치로 입력값으로 두고 Eq. (6)-(14)의 과정에서 필요한 재료상수들을 선택하는 과정을 추론엔진으로 두었다.

단축인장 시험결과를 모델링할 수 있는 재료상수들이 선택이 되면 추론엔진을 통하여, 동일한 해석코드를 이용하여 반복하중하의 재료에 대한 피로해석을 수행한다. 추론엔진에서는 강재의 기본적인 기계적 특성치를 입력한 강재의 일축인장 시험결과와 피로시험결과에서 시뮬레이션 결과와의 오차율을 수식적으로 최적화하여 이들 재료상수를 결정한다.

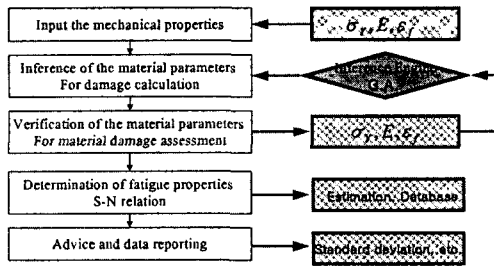


Fig. 1 Procedure for fatigue properties estimation using simple mechanical properties based on damage mechanics approach

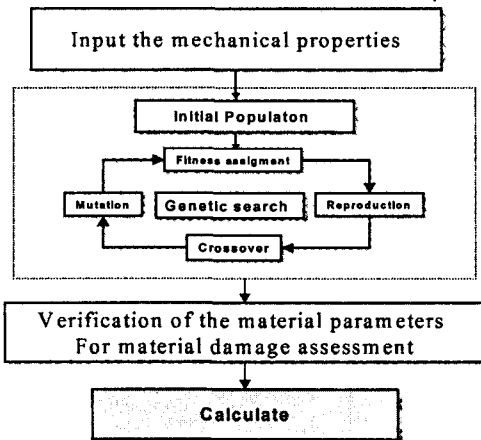


Fig. 2 Initial design system using GP

본 프로그램에 적용하는 유전적 프로그래밍 기법을 이용하여 피로시험의 재료정수의 오차율을 최적화하였다. 추론엔진의 개요를 Fig. 2에 보이고 있다.

Fig. 3는 개발된 시스템의 활용예를 보이고 있다. 시스템의 유용성 검증을 위해, 노르웨이선급(DNV)기준 선급용강재에 대한 S-N 곡선과 본 시스템을 이용해서 얻은 S-N 곡선 예측결과를 Fig.3에 나타낸다. DNV의 S-N곡선은 Mild steel을 대상으로 한 것이다. 손상역학 수법을 이용하여 재료의 피로특성을 평가할 수 있는 기법을 개

발하였고, 사용자 편의를 고려한 GUI type 전문가시스템 pilot code로 확장하였다.

구조물의 피로강도 설계용 기존 데이터를 분석 검토하여 데이터베이스 구축의 자료를 확보하였다. 동시에 각종 용접재료의 손상특성, 피로강도 특성을 분석 정리하여 데이터베이스용 자료에 추가하고 데이터베이스 모듈을 개발한다. 잔류응력, 잔류변형 등 용접영향을 예측할 수 있는 간이식을 도출하여 용접부 강도평가 FEA 코드의 Subsystem으로 사용한다. 이를 바탕으로 용접부 손상평가용 모듈을 완성하였다.

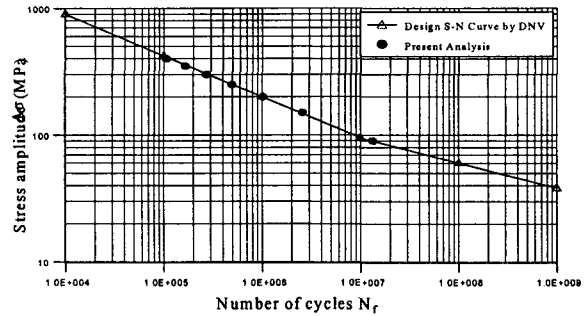


Fig 3 Acomparision between estimated S-N relation and DNV design rule

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구를 통하여 일부 개발을 완료하였고 용접의 잔류응력부의 피로강도 평가 FEA모듈을 개발하고 있다. 개발된 각 모듈을 이용하여 GUI 통합시스템을 구축하면, 가장 효율적이고 비용절감을 기대할 수 있는 설계지원용 기법으로 활용할 수 있으리라 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 부산대학교 첨단조선공학연구센터와 삼성중공업(주)의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. W.S. Jeon and J.H.Song : An expert system for estimation of fatigue properties of metallic materials, Int. J. of Fatigue, Vol. 24, 2002, 685-698.
2. J. M. Lee and Y. Toi, : Elasto-plastic damage Analysis of functionally graded materials subjected to thermal shock and thermal cycle, JSME Int. J. Series A, Vol. 45, No.3, 2002, 331-338.