

전문가시스템 구축을 통한 경도로부터의 재료의 피로특성 추정방법

전 우수* · 송 지호**

A Method for Estimation of Fatigue Properties from Hardness of Materials through Construction of Expert System

Woo-Soo Jeon and Ji-Ho Song

Key Words : 피로특성(fatigue properties), 전문가시스템(expert system), 인장강도(Tensile strength) 경도(hardness), 피로수명(fatigue life)

Abstract

An expert system for estimation of fatigue properties from simple tensile data of material is developed, considering nearly all important estimation methods proposed so far, i.e., 7 estimation methods. The expert system is developed to utilize for the case of only hardness data available. The knowledge base is constructed with production rules and frames using an expert system shell, UNIK. Forward chaining is employed as a reasoning method. The expert system has three major functions including the function to update the knowledge base. The performance of the expert system is tested using the 54 ϵ -N curves consisting of 381 ϵ -N data points obtained for 22 materials. It is found that the expert system developed has excellent performance especially for steel materials, and reasonably good for aluminum alloys.

기호설명

- σ_B : Tensile Strength
- ϵ : 변형율(Strain)
- N_f : 파단수명(Numbers to failure)
- N_p : 예측수명(Predicted life)
- $E_f(s)$: 흠어짐 계수폭(s) 이내의 데이터 비
- \bar{E} : 예측값과 실험값의 적합성 평균치

1. 서론

기계나 구조물의 설계에서는 피로평가가 필수적이다. 피로평가를 하기 위해서는 부하되는 피로하중을 파악하고, 구성재료의 특성을 얻어 비교적 복잡한 피로해석을 수행할 필요가 있다. 따라서 피로에 관한 많은 데이터와 전문지식이 필요하며, 일반 설계자가 신뢰성 있는 피로평가를 수행하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다.

근래, 피로평가와 같이 고도의 전문지식을 필요로 하는 공학분야에서의 문제해결 방법으로, 전문가시스템을 이용하는 방법이 강조되어 여러 시도가 이루어 지고 있다.^(1,2)

그러나, 피로평가 또는 설계를 위한 전문가시스템에 관한 연구는 현재까지도 매우 적으며, 또한 실제 쉽게 사용할 수 있도록 개발된 피로평가 관련 전문가시스템도 매우 적거나 초보적인 것이 실정이다. 전문가시스템의 중요성에도 불구하고, 이와 같이 연구 및 연구성과가 적은 이유 중 하나는, 피로에 관한 유용한 많은 전문지식이 실제 사용되고 있기는 하나, 피로현상이 워낙 복잡하여 각 지식의 적용범위가 반드시 명확하지가 않아, 전문가시스템 구축시 필요한 신뢰성 있는 지식베이스를 구성하기가 의외로 어려우며, 또한 이 지식베이스를 계속 수정 보완해 가는 방법도 그렇게 쉽지 않기 때문이 아닌가 생각된다.

일반적으로 전문가시스템의 질은 지식베이스의 정확성에 의존하고 있으므로, 본 전문가시스템은 현재 존재하는 많은 전문가 지식으로부터 정확하

* (주)정설시스템

** 한국과학기술원

고 신뢰성 높은 지식베이스를 합리적인 기준에 근거하여 구성하는 것이 중요하다.

본 논문은 저자들이 속한 연구실에서 수행된 각종 연구결과를 기본으로 하여 저자들에 의해 개발된 여러 전문가시스템 중, 재료의 피로특성, 구체적으로는 변형률-수명($\epsilon-N$) 곡선을 재료의 기계적 성질로부터 추론하는 전문가시스템에 관해서 서술한 것이다. 특히 사용자가 단지 재료의 종류와 정도만 알고 있는 경우에도 어느 정도 실용 가능한 피로특성을 추정할 수 있도록 구축하였다. 아울러 새로운 실험결과 등의 입력을 통해 지식베이스가 계속 보완되는 유연성이 있는 시스템이라 말할 수 있다. 본 연구에서는 전문가시스템 구축 도구로서 국내 KAIST에서 개발된 UNIK⁽³⁾를 사용하였으며, 데이터베이스와 연동되는 사용자 인터페이스는 Visual FoxPro ver.5.0, 그리고 복잡한 연산처리는 C++을 이용하여 처리하였다.

2. 피로특성 추정방법

피로강도평가 또는 피로해석을 하기 위해서 반드시 필요한 응력-수명(S-N)곡선이나 변형률-수명($\epsilon-N$)곡선과 같은 피로특성은 일반적으로 피로시험을 수행하여 얻어진다. 그러나 피로시험은 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 피로특성은 필요한 때에 언제나 쉽게 얻어지는 것은 아니다. 근래에 편리하게 사용되고 있는 피로강도 데이터북 또는 데이터베이스를 이용하는 방법도 필요한 모든 재료에 대한 만족할 만한 데이터가 있는 것은 반드시 아니다.

따라서 이전부터, 변형률-수명($\epsilon-N$)곡선과 같은 피로특성을 간단한 인장시험 데이터로부터 추정하는 방법이 다음과 같이 여러가지 제안되어, 경우에 따라 유용하게 사용되고 있다. 즉, Manson의 4 점상관법(相關法)과 공통경사법, Muralidharan

과 Manson의 수정공통경사법, Mitchell의 방법, Bäumel과 Seeger의 균일재료법칙, Ong의 수정 4 점상관법 등이다.

그러나 피로전문가라 할지라도 어떠한 경우에 어느 방법을 사용하는 것이 바람직한가 하는 것은 분명하지가 않았다. 그런데, 최근 Park과 Song⁽⁴⁾은 데이터북 등에 보고된 많은 재료의 변형률-수명 실험결과를 사용하여 각 방법의 정확성 또는 각 방법간의 체계적인 상호비교를 정량적으로 실시하였다. 이러한 비교결과는 그 값의 크기로 각 방법의 정확도를 표시하는 파라미터 E 값으로 나타내고 있다. 파라미터 E 값의 상세내용은 참고문헌에 나타나므로 생략하나, Park과 Song은 특히 알루미늄 합금의 경우, 수정 Mitchell 방법을 제안하여 좋은 결과를 얻고 있으며, 또한 수정 Mitchell 방법을 티탄합금에 대해 적용한 결과도 모든 방법 중 가장 좋은 방법이 되고 있음을 발표하였다. 상기 연구결과를 정리해 보면 Table 1과 같으며, 전체적으로는 수정공통경사법이 가장 좋은 결과를 주고 있으나, 엄밀하게는 재료에 따라 각각 다른 방법을 사용하는 것이 합리적일 것이다.

본 연구에서는 상기결과를 종합하여 각 재료별 피로특성을 개별 방법별로 평가할 수 있도록 함과 동시에, 새로운 실험결과와 입력에 따라 방법별 예측 정확도가 갱신되도록 하여, 사용자가 정확도가 높은 방법을 선택하여 피로특성을 합리적으로 추정할 수 있도록 전문가시스템으로 구축하도록 한다.

3. 피로특성 추정 전문가시스템의 내용

피로특성 추정 전문가시스템으로는 크게 다음과 같은 세가지 기능을 갖추도록 한다.

기능 1) 재료가 주어지면, 가장 좋은 가능한 방법을 선택하여 피로특성을 추정하고, 그 추정된

Table 1 Ranking of estimation methods in total predictability for each material group

Material group	Ranking			
	1	2	3	4
Unalloyed steels	Modified universal slopes	Seeger's method	Ong's method	
Low-alloy steels	Modified universal slopes	Seeger's method	Ong's method	
High-alloy steels	Modified universal slopes or Seeger's method		Ong's method	
Aluminum alloys	Modified Mitchell's method	Mitchell's method	Seeger's method	
Titanium alloys	Modified Mitchell's method	Modified universal slopes	Mitchell's method	Seeger's method
Total	Modified universal slopes	Seeger's method	Ong's method	

결과가 어느 정도의 정확성을 지니고 있는가를 현재까지 축적된 데이터를 바탕으로 제시해 주고, 또한 필요한 경우에는 적절한 조언(advice)을 하는 것으로, 피로전문지식이 그다지 많지 않은 일반 설계자가 주로 사용하는 기능.

기능 II) 피로전문가가 현재까지 제안된 각종 피로특성 추정방법을 필요에 따라 자유로이 선택하여, 하고자 하는 작업을 수행하는 기능. 앞 I)의 기능이 도중과정을 자동적으로 수행하여 최종결과를 도출하는데 비해, 본 기능에서는 도중과정을 수동에 의해 수행하여 결과를 얻게 된다.

기능 III) 새로운 실험결과 등이 얻어졌을 때, 전문가시스템의 지식베이스를 갱신(update)하는 기능으로, 각 피로특성 추정방법을 정해진 기준에 따라 평가하여 필요한 지식내용을 갱신하게 된다.

전문가시스템에 포함되는 피로특성 평가법은, 저자들이 현재 아는 모든 평가법 중에서, 실제 유용하다고 판단되는 다음의 7 가지이다.

- Method 1) Manson 에 의한 원래의 4 점 상관법
- Method 2) Manson 에 의한 원래의 공통경사법
- Method 3) Muralidharan 과 Manson 의 수정 공통 경사법
- Method 4) Mitchell 의 방법
- Method 5) Bäümel 과 Seeger 의 균일재료법칙
- Method 6) Ong 의 수정 4 점 상관법
- Method 7) Park 과 Song 의 수정 Mitchell 법

한편, 인장강도를 모를 경우는 재료의 경도 값으로부터 먼저 인장강도를 추정하고, 구해진 인장강도를 이용하여 Method 5)의 Bäümel 과 Seeger 의 균일재료법칙을 써서 피로특성을 평가하도록 한다. 경도로부터 인장강도를 평가하는 방법으로는 최근(1998) 일본재료학회에서 비교적 많은 데이터(철강재료에 대해 305 개, 비철금속에 대해 23 개)를 이용하여, 재료의 비커스 경도와 인장강도에 대해 제안한 다음의 관계를 적용토록 한다.

$$\text{철강재료 } H_v = 0.304\sigma_B + 1.837 \quad (1)$$

$$\text{비철금속 } H_v = 0.242\sigma_B + 21.9 \quad (2)$$

다만, 비철금속의 경우는 알루미늄 합금 및 약간의 동합금에 대한 것이다.

4. 전문가시스템의 구성

4.1 지식베이스의 표현 및 추론방식

개발되는 전문가시스템의 구조는 Fig.1 과 같

이 획득된 전문가 지식을 저장해 두는 지식베이스, 최적 결과를 추론해 주는 추론엔진, 추론 중 생성되는 결과나 지식을 저장하는 작업메모리, 그리고 사용자 인터페이스로 구성된다.

지식베이스 구성에 사용되는 지식표현방법으로서는 사실을 정의하거나 상황정보를 나타내는 선언적 지식은 프레임으로 표현하고, 문제를 해결한 경험을 통해 얻어지는 논리적 판단이나 사실들간의 관계 등을 나타내는 지식들은 규칙으로서 표현하기로 한다.

적합한 피로특성평가 방법을 추론하는 방식으로는, 역방향 추론과 정방향 추론 두가지를 생각할 수가 있으나 본 연구에서는 적합한 평가방법의 제시뿐만 아니라 실제 ε-N 곡선을 얻어야 하므로, 프로그램 구조는 약간 복잡하지만 필요한 데이터의 일괄 입력 및 데이터 갱신 등이 간편하

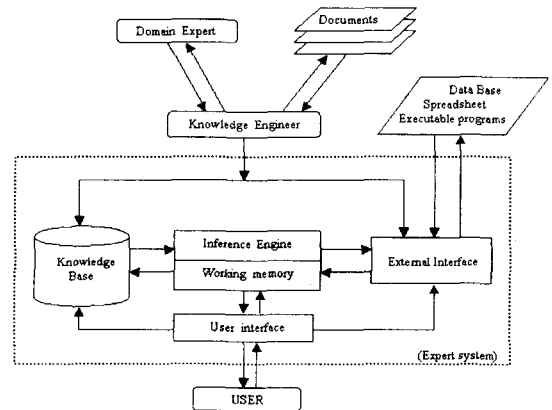
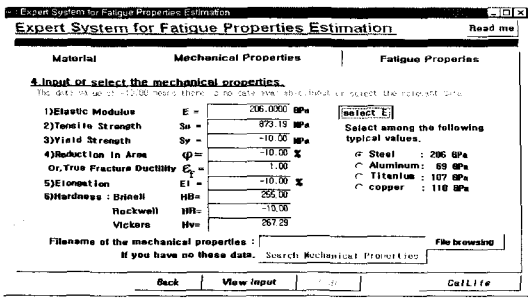


Fig.1 Integration of Expert system components

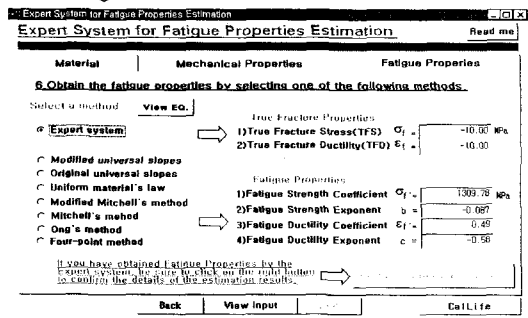
며, 또한 최종 결과에 많은 내용을 쉽게 포함할 수 있는 정방향 추론 방식을 적용한다. 정방향 추론은 패턴매칭(pattern matching) 및 상충집합(conflict set) 구성, 상충해결(conflict resolution), 수행집합(firing set) 구성 및 수행(firing)의 3 단계로 이루어진다. 정방향 추론은 이상의 세가지 과정을 반복하여 결론을 얻게 되며, 더 이상 패턴매칭이 이루어 지지 않으면 추론을 종료하게 된다.

본 연구에서 개발된 피로특성 평가 전문가시스템은 22 개의 생성규칙과 20 개의 메타규칙으로 규칙베이스가 구성되어 있으며, 프레임으로는 각각 재료구분, 기계적 성질, 피로특성, 추정방법을 나타내는 4 개의 기본 프레임이 있다. 인장강도 σ_B 데이터가 없고, 경도만 있는 경우에도, 경도로부터 인장강도를 추정하여 피로특성을 예측할 수

있도록 재료의 경도에 관한 정보는 기계적 성질을 나타내는 프레임에 별도의 슬롯으로 구성한다.



↓ Estimate fatigue properties



↓ Confirm the method

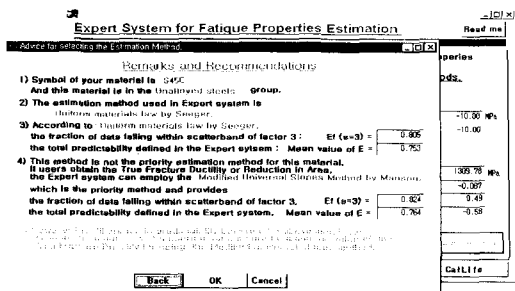


Fig. 2 User interfaces of the estimation module

4.2 전문가시스템의 사용자 환경

개발된 전문가시스템은 피로특성 추정기능과 지식베이스 갱신기능 등 2 개의 모듈로 구성되어 있으며 각 모듈은 각각 3 개와 4 개의 폼 페이지 (Form page)로 구성되어 있다. Fig.2는 피로특성 추정기능을 위한 모듈의 사용자 화면들이며, 대상이 되는 재료의 일반적인 정보를 입력하는 창이다. 피로특성 추정모듈의 첫번째 페이지는 대상재료의 기계적 성질을 입력하는 곳이며, 사용자가 현재 알고 있는 정보를 입력하도록 되어 있다. 기계적 성질데이터는 파일 형식으로 기 저장된 파일을

불러오거나, 본 시스템과 연결된 재료 데이터베이스를 이용하여, 유사한 재료의 데이터를 대신 사용할 수 있도록 되어 있다. 피로특성 추정모듈의 두번째 페이지는 추정방법을 지정하여 결과를 얻는 곳으로서, 전문가시스템을 이용하는 방법 외에 여러 방법 들이 제공되어 있다. 사용하고자 하는 방법을 지정하면, 곧바로 옆 쪽에 결과가 제시되며 페이지 하단에 있는 Remarks & Recommendation 버튼을 누르면, 사용된 평가방법에 의한 오차 및 예측도 정보가 제시되며, 필요한 경우에는 추천안도 보여 준다. 특히 이 페이지에서는 얻어진 ϵ -N 곡선 결과를 이용하여 Callife 버튼을 사용하여 주어진 전변형률 폭 값에 대해 피로수명을 계산할 수 있도록 되어 있다.

지식베이스 갱신모듈의 첫째 페이지와 둘째 페이지는 앞 모듈의 경우와 거의 동일하다. 셋째 페이지가 피로 데이터를 입력하는 곳으로서, 신규 데이터의 입력을 통해, 각 방법에 대한 오차기준에 의해 산출된 E 값과 본 시스템에서 정의하고 있는 예측도 값 \bar{E} 가 제시되며, 이 결과에 의해, 전문가시스템에서 우선적으로 사용할 방법 등이 변경되면, 그 내용도 함께 제시하며 동시에 지식베이스 내용도 갱신한다.

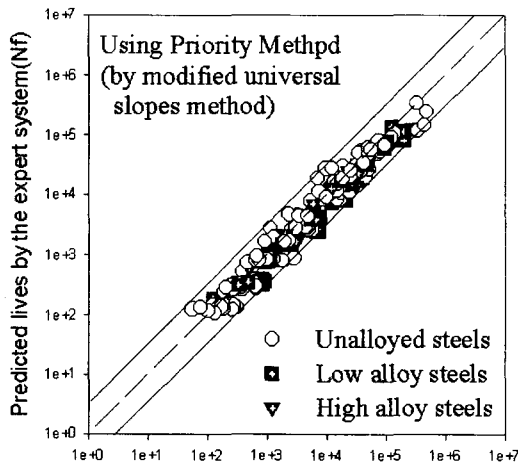
5. 성능검토 및 토론

개발된 전문가시스템의 성능을 일본 금속재료 연구소 (NRIM, National Research Institute for Metals)에서 공표하고 있는 피로데이터와 일본재료학회 논문에서 게재되어 있는 Hatanaka 등의 피로시험 결과⁽⁷⁾를 이용하여 검토하였다. 일본 금속재료연구소의 데이터는 1980년부터 1993년 사이에 데이터 시트 형태로 공표된 것이다. 이용한 피로데이터는 비합금강 5 종류, 저합금강 9 종류, 고합금강 2 종류 등 철강재료 16 종류 총 21 곡선, 알루미늄 합금 3 종류 8 곡선, 티탄합금 재료 3 종류 6 곡선으로서, 계 22 종류이며, ϵ -N 곡선 54 개, 전체 ϵ -N 데이터 점은 381 개이다. 거의 모든 재료에 대해, 항복강도, 인장강도, 참파단응력, 연신율 및 단면수축률의 기계적 성질 및 비커스 경도가 얻어져 있다. 전문가시스템을 이용하여, 각 재료의 기계적 성질로부터 ϵ -N 곡선을 예측하고, 이 ϵ -N 곡선으로부터 예측되는 피로수명과 실제 실험수명을 비교한 결과를 Fig.3에 나타내었다.

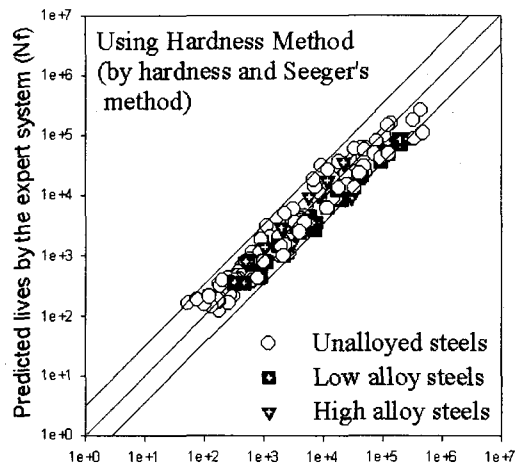
Fig.3(a)의 Priority method에 의한 결과는 Table 1의 Ranking 1 Method에 해당하는 우선방법을

Table 2 Accuracy and total predictability of the expert system using hardness of materials

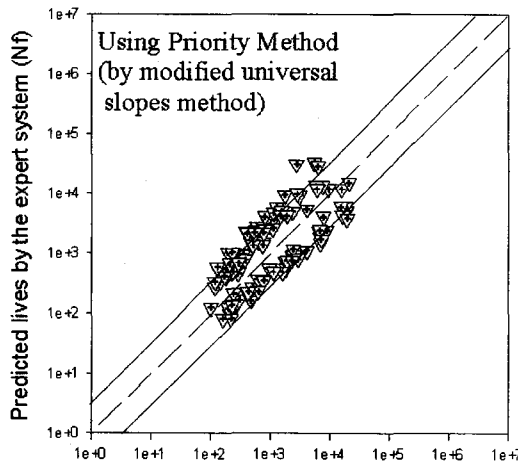
Methods	E Values	Unalloyed steels	Low-alloy steels	High-alloy steels	Al. alloys	Ti. alloys
Priority method	$E_{f(s=3)}$	1.000	0.982	1.000	0.648	0.767
	$(E_a)_{total}$	0.961	0.942	0.801	0.454	0.842
	$(E_a)_{Dset}$	0.856	0.892	0.840	0.794	0.802
	\bar{E}	0.939	0.939	0.881	0.632	0.804
Hardness method	$E_{f(s=3)}$	0.976	0.990	0.929	0.686	0
	$(E_a)_{total}$	0.831	0.886	0.637	0.584	0.583
	$(E_a)_{Dset}$	0.835	0.862	0.719	0.777	0.588
	\bar{E}	0.881	0.913	0.762	0.682	0.390
Number of data set & data points	Data set	21	17	2	8	6
	Data points	127	105	14	105	30



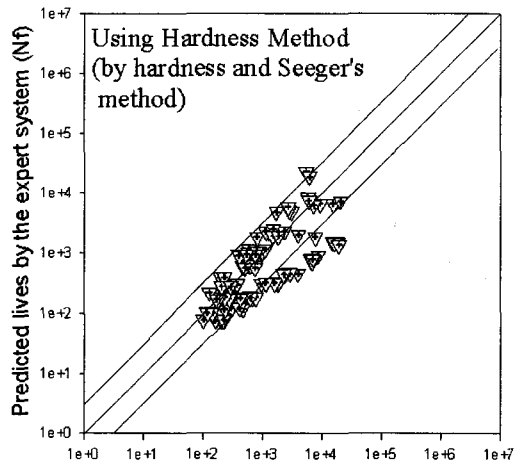
(a) Steels



(a) Steels



(b) Aluminum alloys



(b) Aluminum alloys

Fig.3 Comparison of the predicted and experimental fatigue lives for steels and aluminum alloys (priority method and method using hardness of materials)

사용하여 인장강도로 부터 추정된 피로특성을 이용한 결과로서, 모든 재료에 대해 예측수명은 실제 수명의 3 배수 이내가 되어 전문가시스템의 성능이 좋다는 것을 알 수가 있다.

Fig.3(b)의 Hardness method 란 재료의 경도와 인장강도에 관한 상기 관계식을 이용하여 경도로 부터 인장강도를 추정한 후, 다시 Seeger 의 균일 재료법을 이용하여 수명을 예측한 결과로, 티탄합금의 경우를 제외하고는 비교적 좋은 수명예측이 되고 있다. 특히 철강재료의 경우는 실용상 충분히 이용가치가 기대될 정도이다.

Table 2 는 예측결과를 앞 절에서 설명한 예측 정확성 파라미터 E 값으로 정리한 것으로, 각각 우선방법에 의한 결과와 경도를 이용한 방법으로 나타내고 있다. 우선 방법에 의한 결과는 Fig. 3(a) 에 대한 것으로, 철강재료의 경우는 수정공통경사법에 의한 결과이다. 특히 철강재료는 거의 90% 이상의 예측 정확도를 보이고 있어 전문가시스템의 결과가 매우 좋으며 티타늄의 경우도 80%이상으로 신뢰성 있는 결과를 주고 있다. 다만, 알루미늄의 경우는 60%정도를 상회하는 정확도를 보이고 있어 더 많은 재료에 대한 검토가 필요한 상태이다.

경도에 의한 방법은 Fig. 3(b)에 대한 정리로서, 특히 비합금 및 저합금 철강재료에 대해서는 매우 좋은 결과를 주고 있다. 경도에 의한 결과에서 특히 흥미로운 것은, 알루미늄 재료의 경우, 경도에 의한 결과가 더 좋은 예측도를 나타내고 있다는 점으로서, 알루미늄재료에 대해 경도를 이용하는 방법에 관해서는 더욱 체계적으로 검토할 필요가 있다. 한편 티탄합금의 결과가 나쁜 것은 위의 비철금속에 대한 관계식 (2)가 대부분 알루미늄 합금에 대한 것으로, 티탄합금의 경우에는 맞지 않기 때문이 아닌가 생각된다. 티탄합금에 맞는 경도와 인장강도의 관계식을 구하여, 지식베이스를 보완한 후, 비교적 많은 재료에 대해 예측해 볼 필요가 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재료의 기계적 성질로부터 피로특성치, 구적으로는 ϵ -N 곡선을 추정하는 전문가시스템을 개발하였다.
- 2) 본 전문가시스템은 인장강도가 있는 경우에 각종 철강재 및 티탄합금 재료에 대해 매우 좋

은 결과가 얻어져, 실용상 충분히 이용할 수가 있다는 것을 알 수가 있었다.

- 3) 재료의 경도에 대한 데이터만 있는 경우, 철강재료 및 알루미늄의 경우는 피로특성을 비교적 잘 예측할 수 있다는 것을 알았다.
- 4) 경도데이터만 있는 경우, 티탄합금 등은 추가적인 관계식에 의한 지식베이스의 보완이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) J.Liebowitz, "Expert systems: A Short Introduction", Engineering Fracture mechanics, Vol.50, pp.601-607,1995.
- (2) X. Dai and H. Ishikawa, "Development of Expert system for Fatigue Design(An Object-Oriented Approach to Knowledge Management for Design Process)," Transaction of JSME, A, Vol.60,1994, pp.1885-1891 (in Japanese).
- (3) 이재규, 최형림 외, "전문가시스템 원리와 개발," 법흥사, 1996.
- (4) J. H. Park and J. H. Song, "Detailed Evaluation of Methods for Estimation of Fatigue Properties," International Journal of Fatigue, Vol.17, 1995, pp.365-373.
- (5) K.Hatanaka, J.Ohgi and F. Ueno, "Influence of Heat treatment on Low-Cycle Fatigue in Ti-6Al-4V Alloy," J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol.42, No.481, pp.1153-1159, Oct.1993