

화력발전용 보일러 튜브의 수명평가

김 전 영

한국전력기술연구원 발전연구실 책임연구원



●1945년생.
●파괴공학을 전공하였으며, 기계설비 및 구조물의 파괴해석 상대진단, 수명예측 등 수명평가 기술에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근, 기계 구조물의 유지보수 기술은 예방보수(preventive maintenance) 단계를 넘어 예측보수(predictive maintenance)에 근거한 최적보수를 목표로 하고 있다.

예측보수를 위해서는 수명을 정확히 판단하는 기술이 선행되어야 하므로 최근 수명평가(life assessment)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

이 글에서는 보일러설비 중 가장 가혹한 환경에서 사용되는 보일러 튜브에 대하여 국내 및 국외에서 현용되고 있는 수명예측법에 대하여 기술하여 경년열화 및 수명평가 기술의 개요 및 실용화를 이해하는데 도움이 되고자 한다.

2. 수명평가 기술의 구성

보일러 튜브는 내부에 고온, 고압, 유체(물, 증기)가 흐르고 외부에는 고온의 열원(화염)과 부식성 가스(연소가스)가 접촉하므로 부식, 마모, 크립 및 피로손상이 발생하는 대표적 설비이다. 따라서 수명평가법도 그림 1에서와 같이 이들을 고려하여 간접평가법 및 직접평가법이 모두 이용되고 있다.

간접평가법으로 재료의 크립강도를 기본으로

사용온도와 압력에 따라 해석적 방법으로 수명을 평가하는 Larson-Miller 파라미터법이 이용되고 있으며 직접평가법으로는 사용온도와 내압에 대한 튜브두께의 대항 능력을 평가하는 최소 필요 두께계산법, 크립변형량을 측정하여 크립손상 정도를 평가하는 외경 팽출 측정법 사용재 및 신재의 시료튜브의 크립 파단시험으로부터 잔존수명을 예측하는 크립 파단시험법 등이 이용되고 있다.

2.1 최소 허용 두께변화에 의한 방법

보일러 튜브는 고온에서 장시간 운전되므로 크립에 의해서 수명이 소비될 뿐만 아니라 각종 부식(고온 산화, 고온 부식, 저온 부식) 및 마모(ash cutting, steam cutting, drain cutting)에 의해 두께 감육이 일어나 수명을 단축시킨다. 따라서 그림 2와 같이 경년변화에 의한 두께 감육정도의 변화에 대한 최소 허용 두께를 산출하여 그 이하가 될 때 교체시점으로 추정하는 방법이다.

최소 허용 두께의 계산식은 국가별 규격에 의해 표 1과 같이 내압을 받는 관의 평균경 공식에 근거하여 정하여져 있으나 표 2에서 보는 것과 같이 설계 응력 결정시 안전율을 고려하고 있으므로 실설비에서는 이보다 작은 두께가 되어도 파열사고가 발생하지는 않는다.

최소 허용 두께 산출시 튜브 두께의 결정은 표 1의 식을 이용하여 이때 허용응력(S)는 그

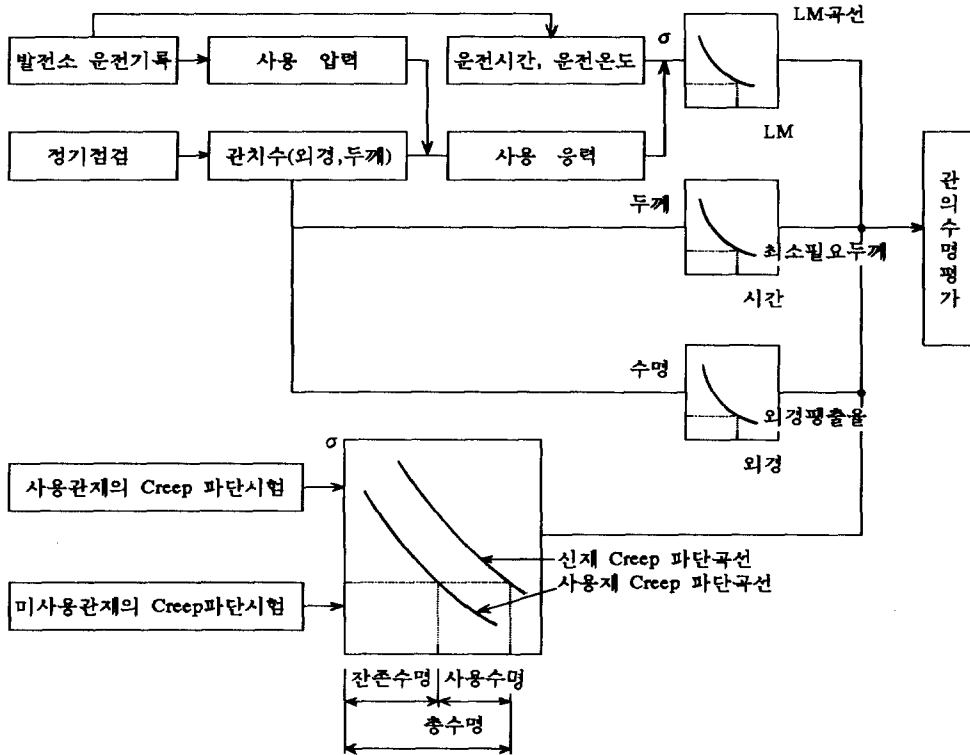


그림 1 보일러 튜브의 수명평가 및 기술의 구성

림 3과 같은 Larson-Miller 파라미터로부터 사용시간에 대한 LM 치에 해당하는 허용응력을 구한다. 사용시간이 증가할수록 재료의 허용응력은 감소하므로 튜브의 최소 허용 두께는 점점 커지게 된다.

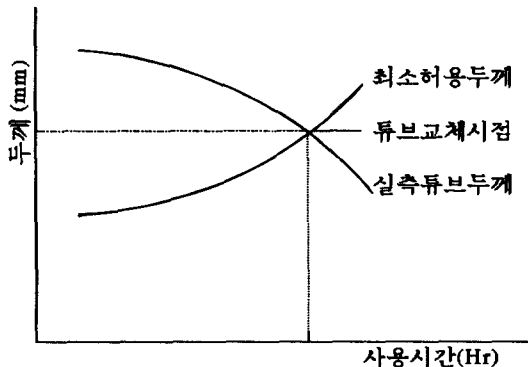


그림 2 최소 허용 두께의 변화

2.2 Larson-Miller 파라미터에 의한 방법

이 방법은 Larson과 Miller가 주어진 경도를 얻기 위하여 필요한 열처리 시간을 계산하는 식에 착안한 것을 크립 파단시간 예측에 이용한 방법이다.

이 Larson-Miller 파라미터는 그림 4와 같이 크립 응력이 같고 온도만 다른 경우(즉 ISO-stress 조건), Y축을 $\log tr$ (tr 은 크립 파단시간), X축을 $1/T$ (T 는 온도)로 하여 그래프를 그리면 등응력 곡선(응력이 같고 온도만 다른 경우 크립 파단시간과 온도의 관계곡선)이 직선으로 구해지며 각 직선의 기울기는 응력에 따라 다르지만 모두 Y축상의 한점에 수렴한다는 것을 의미한다. 이에 대한 물리적 의미는 온도가 아주 높은 경우 어떤 크기의 응력을 가하든 같은 시간에 크립 파단이 일어난다는 것이다.

표 1 각 국가별 최소 허용 두께 계산식

국 명	계 산 식	비 고
독 일	$t = \frac{PD}{2E(K/A) + P}$	t=최소 허용 두께 (cm) P=설계압력 (kg/mm ²) D=외경 (cm) s=허용응력 (kg/mm ²) K=강도 (kg/mm ²) A=안전율 E=용접효율 (무계목인 경우 1.0)
영 국	$t = \frac{PD}{2SE + P}$	
미 국	$t = \frac{PD}{2S + P} + 0.005D$	
일 본	$t = \frac{PD}{2S + P} + 0.005D$	
I S O	$t = \frac{PD}{2S + P} + 0.005D$	

표 2 각 국가별 보일러 튜브 설계 응력

	독 일	영 국	미 국	일 본	I.S.O
	T > 350°C	T > 150°C			T > 250°C
인장강도(최소치)		0.37	0.25	0.25	0.37
항복강도(최소치)	0.667	0.625	0.625	0.625	0.627
10 ⁵ 시간 파단응력 (평균)	0.667	0.625	0.667	0.60	0.625
10 ⁵ 시간 파단응력 (최소)		0.78	0.80	0.80	0.78
1%/10 ⁵ 시간 크립응력		1.00	1.00	1.00	1.00

이 직선을 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\log(\text{tr}) = \frac{Q(\sigma)}{T} + C \quad (1)$$

식 (1)에서 Q(σ)는 Larson-Miller 파라미터를 의미하므로 식 (2)로 표시된다.

$$LM = T(\log(\text{tr}) + C)$$

여기서, T는 절대온도(K), C는 상수(=20), tr는 크립 파단시간을 나타낸다.

위의 식에서 알 수 있듯이 파단시간을 임의의 온도와 응력에서 구할 수 있다. 이 식에서 응력 계산식은 관의 평균경 공식에 의해 평가한 식 (3)과 같다.

$$S = \frac{P}{2}(D/t - 1) \quad (3)$$

여기서, S는 응력(kg/mm²), P는 증기압력(kg/mm²), D는 관외경(mm), t는 관두께(mm)를 나타낸다.

이때 사용되는 Larson-Miller 곡선은 그림 3을 이용한다.

2.3 크립 파단시험에 의한 방법

사용관의 잔존수명을 평가할 때 Larson-Miller 파라미터 곡선이 없으면 미사용관의 크립 파단곡선, 사용관의 크립 파단곡선, 관벽온도의 측정결과가 있어야 하는데(운전시간과 사용응력은 이미 알고 있음) 이 세 가지중 최소한 두 개만 알면 잔존수명의 추정이 가능하다.

실제에 있어 불명확하고 임의로 결정하기 힘든 것이 관벽온도이며 대개의 경우 정확히 알 수 없다. 이와 같이 사용온도를 모를 경우는

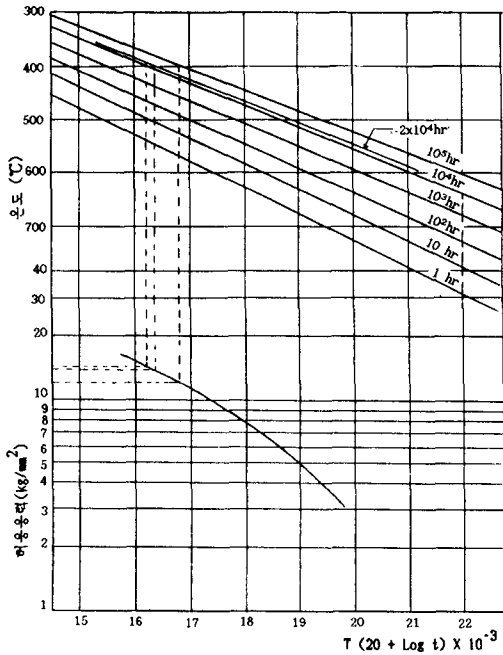


그림 3 STB35 Larson-Miller 곡선

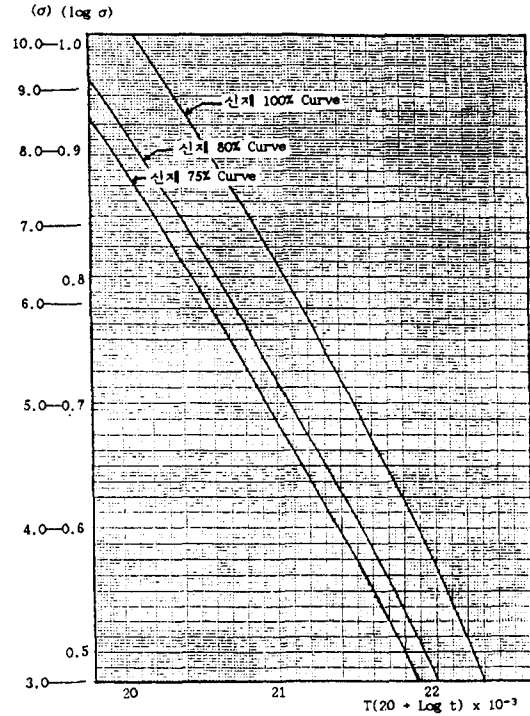


그림 5 SA213-T22 Larson-Miller 곡선

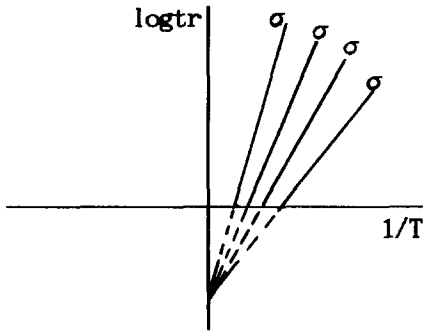


그림 4 L.M 파라미터의 원리

미사용관과 사용관의 크립 파단시험결과를 이용하여 등가온도를 추정하게 된다. 이 등가온도의 의미는 튜브가 받은 각종 온도구간에서의 손상(damage)과 크립, 피로 등 모든 영향을 종합적으로 포함한 파라미터적 의미를 갖는다.

등가온도를 결정하고 잔존수명을 추정하는 방법을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

1) 먼저 미사용재와 사용재의 크립 파단시험결과를 Larson-Miller 파라미터로 정리하여 크

립 파단 주곡선(master curve)을 구한다. 이것은 온도와 시간을 한 개의 변수 즉 파라미터로 하여 이 값에 대한 크립파단응력을 표시한다.

2) 평균경 공식에 의하여 사용응력(S)를 구한다.

3) 사용응력(S)에서의 미사용재와 사용재의 파라미터 값 P_2, P_1 을 미사용재와 사용재의 크립 파단 주곡선(master curve)에서 구한다.

4) 잔존수명을 t_1 , 전수명 t_2 , 운전시간을 t 라 하면, 다음과 같다.

$$t_2 = t_1 + t \quad (4)$$

또는,

$$P_2 = Te(\log t_2 + C) \quad (5)$$

$$P_1 = Te(\log t_1 + C) \quad (6)$$

여기서, Te 는 등가 사용온도이고, C 는 재료상수이다. 따라서 식 (4)를 식 (5)에 대입하면 식 (7)과 같다.

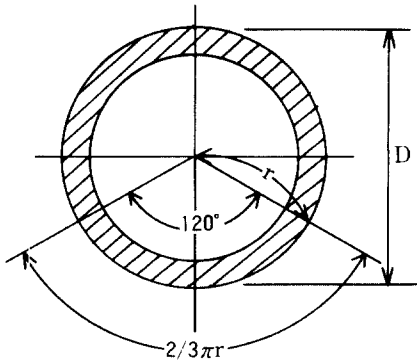


그림 6 보일러 튜브의 외경 팽출부

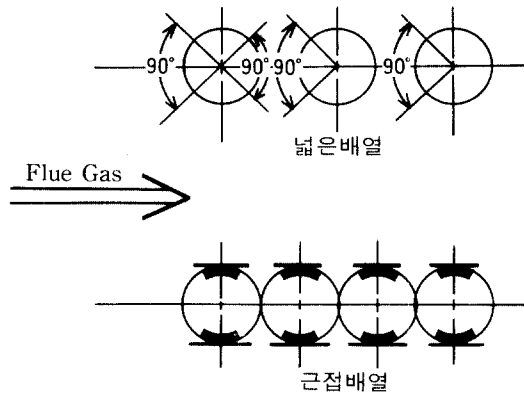


그림 7 튜브의 배열과 두께감육

$$P_2 = Te(C + \log(t_1 + t)) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 연립하여 풀면 t 는 이미 아는 값이므로 Te 및 잔존수명 t_1 을 구할 수 있다.

이상은 기본적인 방법이며 사용응력을 일정한 것으로 취급했으나 실제에 있어서는 고온산화, 부식마모 등에 의하여 두께 감육이 일어나 같은 증기압력에서도 실제 사용응력이 증가한다.

두께 감육을 고려하여 평균경 공식에 의해 사용응력을 계산할 때는 발관(시료 튜브채취)시 두께와 외경을 측정하여 이 값을 넣어 계산하며 이 응력에서 등가온도와 잔존수명을 추정한다. 이와 같이 두께 감육을 고려하면 등가온도가 실제 사용온도보다 높게 나타난다.

그림 5는 크립 파단 시험결과에 의해 주곡선(master curve)을 작성한 예이다.

2.4 외경 팽출량 측정에 의한 방법

보일러 튜브는 고온에서 내압 즉 외측으로 응력을 받아 장기간 운전되므로 크립현상에 의해 외경이 팽출한다.

이러한 현상은 크립에 의해 재질이 열화된 것으로 보일러 튜브의 경우 외경 팽출량이 1%일 때 수명의 60% 소비, 2%일 때 전수명이 소비된 것으로 판단하여 교체한다.

외경 50mm의 튜브를 예로 보면 외경이 51mm일 때 2%만큼 팽출된 것이나 그림 6에서

와 같이 고온의 복사열이나 가스와 접촉하는 부위는 전체 원주의 1/3이 실제 팽출하므로 6%의 팽출량이 나타난다고 할 수 있다.

그림 7은 보일러 튜브의 배열에 따른 두께감육 부위를 나타낸 것으로 두께 측정시는 이들을 고려한다.

3. 맺음말

보일러 튜브의 열화원인에 근거하여 수명을 평가하는 방법 중 실제 현장에서 실용화되고 있는 방법들에 대하여 개략적이거나 기술하여 개념을 정립코자 하였다.

그러나 실제 보일러는 설비가 방대할 뿐만 아니라 사용조건이 가혹하여 수명예측을 위한 평가기술만으로 설비를 사고없이 안전하게 운용하기는 대단히 힘들다. 또한 기술분야도 재료, 강도, 설계, 부식, 연소 등 대단히 광범위하여 많은 관련자를 필요로 하므로 설계자, 제작자, 사용자, 연구자 및 기능 분야 등이 독립적이고 종합적인 협조하에서만 사고를 예방할 수 있다.

따라서 경년열화 및 수명평가 연구에 관심이 있는 각 분야의 종사자들이 꾸준히 함께 노력할 때만이 우리 나라 장치산업의 운용기술 축적이 가능하리라 여기며 상호간의 노력을 다짐한다.