

음향방출법에 의한 고강도 구조용 내화강의 열화특성에 관한 연구

김현수* · 남기우** · 강창룡**

*부경대학교 대학원 재료공학과, **부경대학교 재료공학부

A Study on Degradation Characteristic of High Strength Fire Resistance Steel for Frame Structure by Acoustic Emission

Hyun-Soo Kim, Ki-Woo Nam AND Chang-Young Kang

Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: High Strength Steel for Frame Structure 고강도 구조용 내화강, Fire Resistance Steel 내화강, Time Frequency Analysis 시간 주파수 해석, Acoustic Emission 음향방출, Nondestructive Evaluation 비파괴 평가

ABSTRACT: Demand for new nondestructive evaluations is growing to detect tensile crack growth behavior to predict long term performance of materials and structure in aggressive environments, especially when they are in non-visible area. Acoustic emission technique is well suited to these problems and has drawn a keen interests because of its dynamic detection ability, extreme sensitivity and location of growing defects. In this study, we analysed acoustic emission signals obtained in tensile test of high strength fire resistance steel for frame structure with time frequency analysis methods. The results obtained are summaries as follows ; In the T and TN specimen consisting of ferrite and pearlite grains, most of acoustic emission events were produced near yield point, mainly due to the dislocation activities during the deformation. However, B specimen under 600 °C-10min had a two peak which was attribute to the presence of martensite phase. The first peak is before yield point the second is after yield point. The sources of second acoustic emission peak were the debonding of martensite-martensite interface and the micro-cracking of brittle martensite phase. In 600 °C-30min to 700 °C-60min specimens, many signals were observed from area before yield point and counts were decreased after yield point.

1. 서 론

내화강(Fire Resistant Steel, FR강)은, 일반적으로 Cr과 Mo등의 합금을 첨가한 것으로 고온내력을 많이 향상시킨 강재이다. 압연이후의 공정은 일반적으로 강과 동일하다. 철골조로 이루어진 건축물은 화재가 발생하면, 건축물을 이루는 강재의 강도가 낮아지게 되고, 그 결과 건축물로서 필요한 내력이 유지되지 않는 문제가 발생되어 붕괴될 수 있는 위험이 존재한다. 따라서 일반적으로 내화강은, 600°C에서 항복강도가 상온에서 내력규격 값의 2/3이상을 가지고, 상온특성은 용접구조용 압연강재, 건축구조용 압연강재의 규격에 일치해야하며, 일반강과 동등한 용접성을 가져야 한다 등의 조건을 만족하여야 한다(伏見, 1995; 谷, 1995; 藤田, 1996).

현재까지 고온강도가 우수한 강에 대한 연구는 주로 중·고온용 압력용기, 보일러의 튜브 등에 사용될 목적으로 하는 내화강에 대해서는 많이 진행되어 오고 있을 뿐 건축구조용 내화강을 대상으로 기계적 성질 및 비파괴 특성을 연구한 논문은 적은 실정이다.

음향방출은 구조물의 다가올 파손에 대한 경보신호

를 제공하는 장점 때문에, 구조물의 안정성 평가에 있어서 비파괴 검사의 한 수단으로 여러 분야에 이용되고 있다. 최근에는 재료의 변형 및 미시적 파괴거동을 연구하는 재료평가수단으로도 널리 사용되고 있다. 이것은 음향방출이 재료의 소성변형이나 파괴과정 중에 일어나는 미시적인 현상들(전위의 이동 및 개재물의 분리 등)에 의해 발생되며, 그 발생거동은 미세조직에 민감하게 반응하기 때문에 음향방출의 발생 특성과 주어진 외부적 조건의 관계를 조사함으로써 재료의 미시적 변형거동과 파괴거동에 대한 상세하고 직접적인 정보를 얻을 수 있다(홍, 1995; 이, 1996; R., 1999). 그러나, 지금까지의 연구에서는 진폭 분포, 이벤트 등과 같은 음향방출 파라메터들에만 국한되어 이루어지고 있을 뿐, 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석한 결과는 거의 없는 실정이다(이, 1999; Ki-woo, 1999).

따라서, 본 연구에서는 화재 후 내화강의 재사용 여부를 평가하고자, 내열강의 열화처리 후 인장시험에 의하여 강도를 평가함으로써 구조물의 재사용 여부를 판단하고, 인장시험 중에 음향방출법을 적용하여 재료의 미시적인 변형과 음향방출과의 상관관계를 조사하였다.

2. 실험방법

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

Spec.	C	Mn	Mo	Ti	N	B	Fe
T	0.11	0.97	0.48	0.02			Bal.
TN	0.11	1.04	0.48	0.018	0.015		Bal.
B	0.12	1.16	0.49	-	-	>0.0144	Bal.

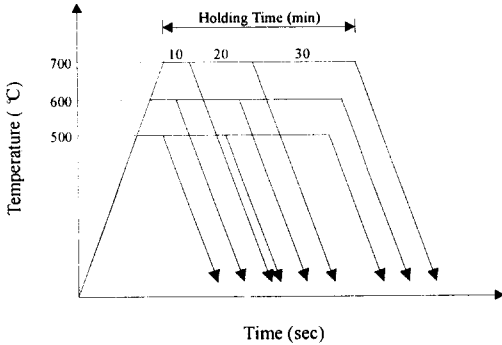


Fig. 1 Schematic drawing of heat treatment process

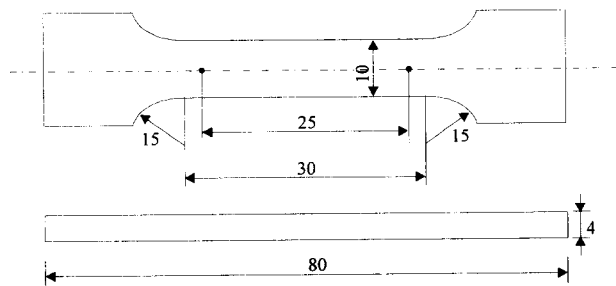


Fig. 2 Dimension of tensile specimen (in mm)

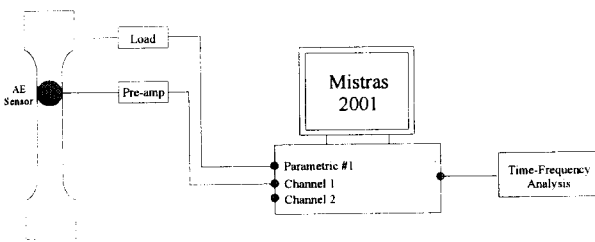


Fig. 3 Schematic diagram of AE system

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는, 기존에 사용되고 있는 재료의 기계적 물성치를 향상시키기 위하여 화학성분을 변화시켜 제조한 것이다. 기존에 사용되고 있는 건축 구조용 내화강의 0.13~0.14C 탄소함량을 용접성의 향상을 위하여 0.11~0.12로 감소시켰다. 본 실험에 사용된 시험편의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 사용된 시험편은 탄소함량

을 감소시키고 Ti를 첨가한 것(이하, T시편으로 명명), Ti와 N을 첨가한 것(이하, TN시편으로 명명) 및 B를 첨가시킨 것(이하, B시편으로 명명)이다. 각각의 시험편을 1200°C로 가열한 후 압연을 시작하여 950°C에서 완료한 다음 공랭하였다. 재료의 화재 후 재사용 여부의 가능성을 평가하기 위하여, 열처리하는 3종류의 시험편을 500°C, 600°C, 700°C에서 각각 10min, 30min, 60min 동안 유지한 후 공랭하였다. 열처리 조건을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 인장실험

인장 시험편은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 KS규격 5호에 의거하여 폭 10mm, 표점거리 25mm인 평판시험편으로 제작하였다. T, TN 및 B시험편의 화재 후 재사용 여부의 가능성을 평가하기 위하여, 최대용량 5톤을 갖는 Instron社의 만능시험기(4204 model)를 사용하여 cross head speed 1 mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다.

2.3 음향방출 시스템

인장시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 인장 시험에서 발생하는 음향방출 신호는 PAC社의 Mistras 2001(2 channel)을 사용하여 검출하였다. AE센서는 1MHz 광대역 센서를 사용하였고, 검출된 음향방출 신호를 100~1200kHz 아날로그 필터가 내장된 Pre-amp에서 40dB 증폭시킨 후, Mistras 2001 Board 내부에 포함된 A/D변환기로 디지털 변환시킨 다음, 최종적으로 시간-주파수 해석법을 사용하여 실시간적으로 분석하였다. 본 실험에서는 전기적 및 기계적 잡음을 제거하기 위하여, Threshold를 45dB로 설정한 후 신호를 검출하였다.

3. 국부파괴 변형률의 개요

Fig. 4는 인장실험을 실시한 후 공칭응력과 공칭변형률의 관계를 도식적으로 나타내었다. 시험편에 응력이 증가되어 σ_{ys} 에 이르면 변형률은 ϵ_{ys} 가 되고 항복이 발생한다. A점 이후에서는 응력을 제거하여도 원래의 상태로 복귀되지 않으므로 재료 역학적인 설계개념에 의하면 이 이하의 응력에서 사용되도록 설계하여 왔다.

가공경화에 의해 응력이 증가되어 B점에 이르면 더 이상의 응력을 증가시키지 않아도 파괴에 이르게 되므로 이때의 응력 σ_u 를 최대인장강도라 하며 이 이하의 응력에서만 파괴에 대한 안정성이 보장된다. 그러나 변형률로 보면 응력이 σ_u 일때의 변형률 ϵ_u 에서는 파괴에 이르지 않고 국부수축부에서는 중심부가 최대의 인장응력 상태로 되며 이 부분에서는 시험편 내부의 결함이나 비금속 개재물에 의한 보이드(void) 형성 및 합체가 일어나 넥킹(necking)이 일어난다.

변형률이 더욱 증가하여 ϵ_c 에 이르게 될 때 파단이 일어남을 알 수 있으며 변형률이 극한값에 이를 때 균열의 찢어짐이 시작될 것이다.

즉, 인장실험시 국부수축 후 파단이 일어날 때 국부적으로

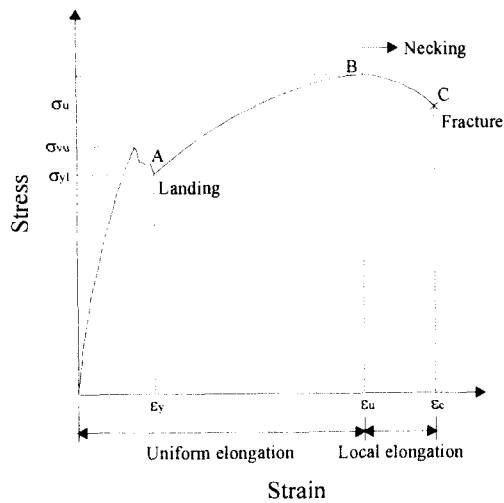


Fig. 4 Typical nominal stress - strain curve

응력이 집중되어 변형률이 그 임계치에 도달할 때 파괴됨을 고려하면 연성 균열재에서도 균열선단이 둔화된 후 찢어짐 (tearing)이 일어나므로 연성재료에서는 인장시험시의 ϵ_c 가 국부 파괴 변형률로 생각할 수 있다.

따라서 인장시험시 파단된 부분은 국부 파괴 변형률(ϵ_c)을 알 수 있으며 $\epsilon \leq \epsilon_c$ 의 안전조건을 적용하여 안정성 평가를 할 수 있을 것이다(차, 2000).

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미세조직 관찰

본 연구에서는 모든(T, TN 및 B) 시험편에 대해서 각각의 열화처리 시간(10, 30 및 60min)과 열화처리 온도(500, 600 및 700℃)에 따른 미세조직을 조사하였다. 그러나 여기서는 대표적으로 0.1%C-1%Mn-0.5%Mo를 기본조성으로 하는 시료에 0.02% Ti를 첨가한 T 시험편의 미세조직을 500, 600 및 700℃에서 각각 30min 동안 열화처리한 조직사진을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 나타나는 것처럼 열화온도가 증가할수록 결정립 크기가 증가하고 있으며, 베이나이트와 펄라이트가 차지하는 비율이 감소하고 페라이트가 차지하는 비율이 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

각 시험편에 대하여 열화온도 및 시간에 따른 미세조직의 변화를 보다 세밀하게 조사하기 위하여 각 시험편에 대하여 주사전자 현미경으로 미세조직을 관찰하였는데 이것을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 나타나는 것처럼 열화시간 및 열화온도가 증가할수록, 특히 600℃-30min을 경계로 결정립 주위에 Mo와 Ti 등으로 이루어진 비교적 구형의 형상을 갖는 1 μ m 정도의 미세한 탄화물(화살표로 표시)이 석출하고 있는 것을 알 수 있고, 열화온도가 증가할수록 탄화물의 수가 증가하는 것을 알 수 있다(강, 1999).

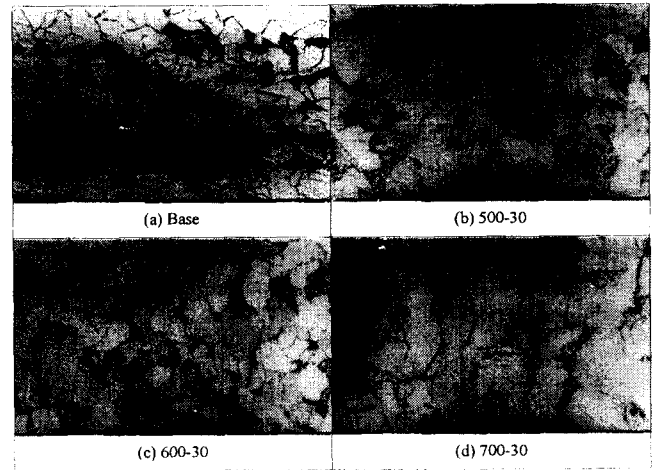


Fig. 5 Optical micrographs showing the T specimen by degradation temperature

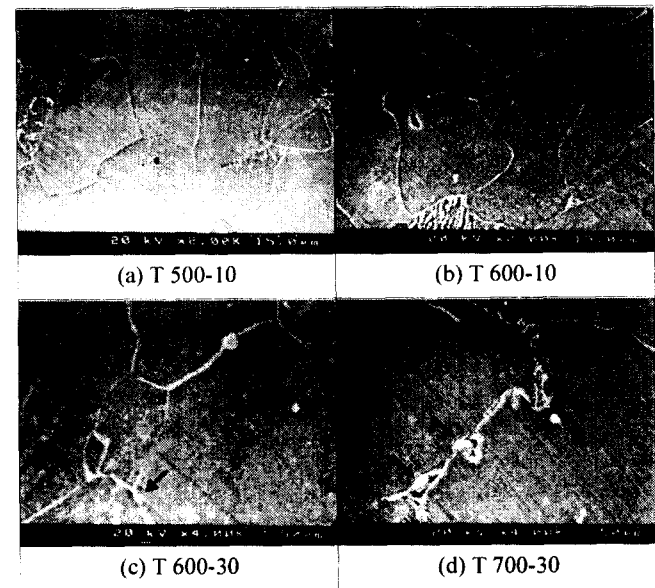


Fig. 6 SEM micrographs showing the T specimen

4.2 강도 특성

본 실험에서는 화재 후 재사용 여부의 가능성을 확인하기 위하여 모든 시험편을 여러 가지 온도에서 열화처리를 실시한 후 상온에서 인장시험을 실시하여 온도이력 후 강도 특성을 조사하였다.

Fig. 7은 모든 시험편에 대해서 500, 600 및 700℃로 가열한 후 각각 10, 30 및 60min동안 유지한 다음 공랭시킨 후 상온에서 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도, 항복강도 및 항복강도 비를 열화 온도 및 시간에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 7에서 나타나는 것처럼 B, TN 및 T시험편의 순서로 인장강도가 높게 나타났다. 이것은 미세조직이 T시험편의 경우는 펄라이트와 페라이트의 혼합조직으로 구성되어 있고, TN시험편은 T시험편에 N의 첨가에 의하여 T시험편보다 베이나이트 양이 현저히 많은

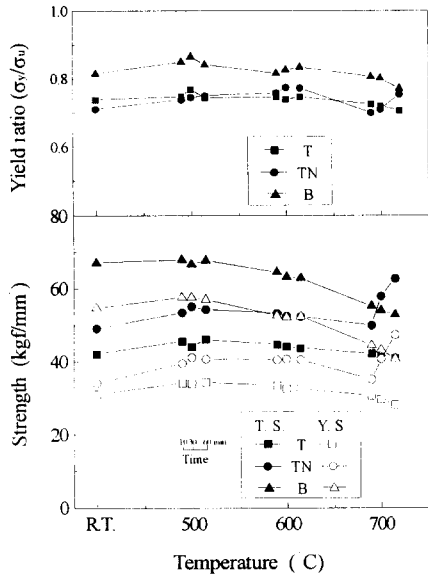


Fig. 7 Effect of degradation temperature and time on the tensile properties of specimens

형태로 나타났다. 따라서 인장강도가 T시험편보다 높게 나타난다고 판단된다. 더욱이 B시험편의 경우에는 경화능이 큰 B의 첨가에 의하여 기지조직이 펄라이트와 페라이트 보다 강한 마르텐사이트 조직으로 이루어져 있기 때문에 T 및 TB시험편보다 인장강도가 높게 나타났다고 판단된다.

동일한 열화온도에서 시간에 따른 인장강도의 산포는 어느 정도 존재하지만, 전체적으로 열화온도가 증가할수록 결정립의 조대화 및 탄화물 등의 석출에 의하여 인장 및 항복강도 값이 감소함을 알 수 있다. 그러나 TN시험편의 경우는 열화온도가 700°C인 경우에 있어서 열화시간이 증가할수록 인장 및 항복강도가 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 이것에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다고 생각한다.

모든 시험편에 있어서, 어느 열화온도에서도 항복강도비가 0.7이상의 높은 값을 나타냄으로서 건축구조용 내화강에서 요구하는 조건인 2/3보다 높은 값을 알 수 있고, 항복강도 값이 28kgf/mm² 이상으로 높은 항복강도 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 사용한 재료는 화재 발생 후에도 사용 가능하다고 판단된다.

4.3 음향방출거동

Fig. 8은 T시험편의 인장시험 중 나타나는 음향방출거동을 각 조건에 따라 나타낸 것이다. Fig. 8에서 (a)~(d)는 인장시험 중 발생한 음향방출 신호들의 count값과 응력(stress) 및 누적 count값을 시간에 대하여 겹쳐서 그린 것이다. 본 연구에서는 모든 시험편에 대해서 음향방출신호를 측정하였지만, 여기서는 대표적으로 T시험편에 대하여 나타내었다. Fig. 8(a) 및 (b)에서 나타나는 것처럼 500°C 모든 시험편들과 600°C-10min 동안 열화한 시험편에서는, 항복점 이전에서는 count가 작은 신호들이 주로 관찰되었고 항복이 시작되면서 count가 큰 신호들이

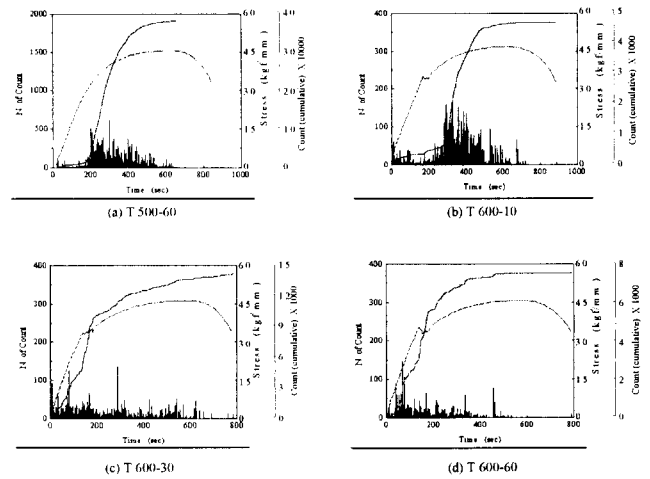


Fig. 8 AE count produced during the tensile test of T specimen

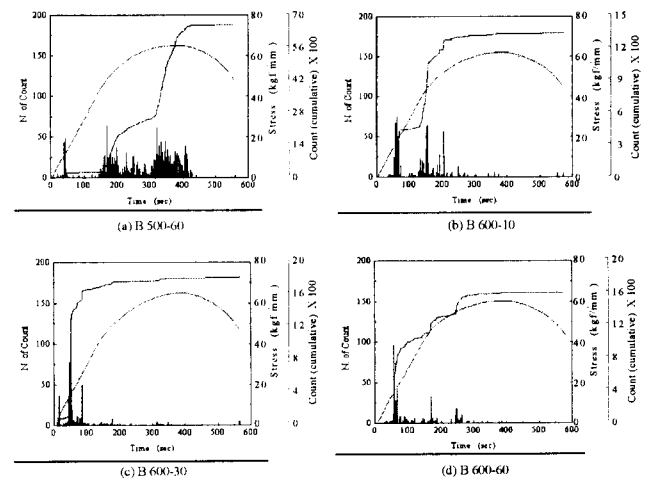


Fig. 9 AE count produced during the tensile test of B specimen

검출되었다. 시험편이 최대 인장강도에 가까워지면서 신호의 검출이 줄어들며, 최대 인장강도에서부터 파단이 되기 직전까지는 거의 신호가 검출되지 않았다.

전위의 이동에 의한 음향방출신호는 항복점 부근에서 최대가 되고 항복점 이후에는 점차로 감소된다고 Scruby 등이 정량적으로 분석한 바 있다(C., 1981). 또한, 다른 연구자들에 의해서도 항복점 부근에서 나타나는 음향방출 신호들은 대부분 낮은 에너지를 갖는 신호들로서 주로 전위의 움직임에 기인하는 것으로 밝혀지고 있다. 따라서 본 연구에서도 항복점 이전에서 낮은 count로 나타나는 신호들은 전위의 이동에 의한 소성변형에 의하여 검출된 신호라고 판단된다. 항복이후의 소성영역에서 검출되는 높은 count들의 신호는 주로 탄화물의 분리와 판통, 미소균열 혹은 intergranular delamination에 의한 결과라고 판단된다(홍, 1995; 이, 1996).

그리고, 600°C-30min(Fig. 8(c) 및 (d)부터는 그 이전의 시험편과 비교해서 전체적으로 count의 발생빈도가 적고, 탄성영역에서부터 count가 큰 신호들이 검출되었다. 이것은 Fig. 6의 주사전자현미경에서 나타나는 것처럼, 600°C-30min부터는 결정립

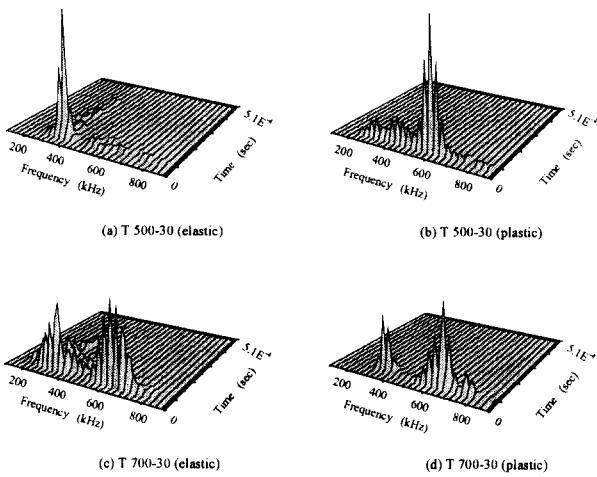


Fig. 10 Time-frequency analysis for elastic and plastic area of T specimen

주위에 탄화물이 석출되었는데 탄성영역에서 이런 탄화물이 분리되면서 검출되는 신호라고 판단된다. TN시험편은 T시험편과 동일한 양상을 나타내었다.

B시험편의 경우에 있어서 600°C-10min까지의 시험편에서는 동일한 조건하에서의 T 및 TN시험편과 다른 양상이 나타났는데 이것을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a) 및 (b)에서 나타나는 것처럼 B시험편의 경우는 항복점 이전에 1차 피크가 나타나고 항복점 이후에 2차 피크가 관찰되었다. 이런 2차 피크는, B시험편의 경우는 T 및 TN시험편과는 다르게 기지조직이 마르텐사이트로 구성되어 있어서, 항복점 이후의 영역에서 마르텐사이트내부 혹은 마르텐사이트와 구 오스테나이트 결정립 사이에서 미소균열이 발생하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다(허, 1997). 그러나 Fig. 9(c) 및 (d)에서 나타나는 것처럼 600°C-30min 이후부터는 다른 시험편들과 비슷한 음향방출거동을 나타내었다.

이상에서 모든 시험편에 있어서 600°C-10min까지는 각각의 시험편이 갖는 특성을 나타내었으며, 600°C-30min부터의 열화 처리시에는 모든 시험편에서 거의 비슷한 양상을 나타내었다. 따라서, 본 연구에 사용된 재료의 경우에는 600°C에서 30min 이상 열화되었을 경우에는, Fig. 7의 강도변화처럼 거시적으로는 나타나지 않지만 Fig. 8 및 Fig. 9에서와 같이 미시적으로 재료의 특성이 변화한다고 예상할 수 있다.

4.4 주파수 분석

Fig. 10는 인장시험 중 검출된 음향방출 신호들을 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석한 결과를 나타내었다. 먼저, 600°C-10min까지 시험편의 탄성영역에서 검출된 신호는 Fig. 10(a)에 나타나는 바와 같이 주파수가 300~400kHz 사이로 나타났다. 이것은 4.3항에 나타난 바와 같이 주로 전위의 이동에 의하여 검출된 신호라고 판단된다. 소성영역에서 검출된 신호(Fig. 10(b))는 주파수 영역이 550~650kHz로 나타났다. 이것은 주로 탄화물의 분리 혹은 intergranular delamination에 의하여 나타나는 신호들로 판단된다.

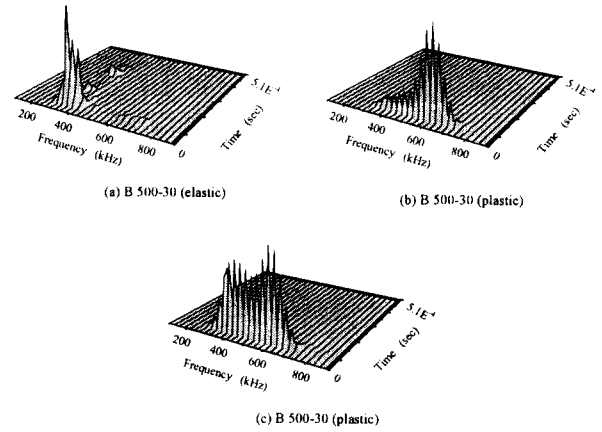


Fig. 11 Time-frequency analysis for elastic and plastic area of B specimen

그리고, 600°C-30min 이후 시험편의 탄성영역(Fig. 10(c))에서는 전위의 이동에 의한 신호들(300~400kHz)과 600°C-10min까지의 시험편들에서 소성영역에서 관찰되었던 600kHz 영역의 신호들이 함께 검출되었다. 이것은 Fig. 6의 주사전자현미경 사진에서 나타나는 것처럼 이 조건에서부터 결정립 주위에 탄화물의 석출이 관찰되었다. 따라서 신호의 600kHz 영역은 이들 탄화물이 분리되면서 검출된 신호라고 판단된다. 소성영역(Fig. 10(d))에서는 앞 조건과 동일한 영역의 신호(550~650kHz)가 나타났다.

B시험편의 경우에는 Fig. 9(a) 와 (b)에 나타나는 것처럼, T 및 TN시험편에서는 볼 수 없었던 형태의 음향방출거동을 나타내었다. 이때의 신호들을 시간-주파수 해석법을 통하여 분석한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 먼저, Fig. 11(a)는 다른 시험편에서와 마찬가지로 B시험편에서도 탄성영역에서는 전위의 이동에 의한 것이라고 판단되는 신호 영역이 관찰되었다. Fig. 11(b) 역시 다른 시험편이 소성영역에서 탄화물의 분리시 나타나는 550~650kHz 영역의 신호가 관찰되었다. 하지만, Fig. 11(c)는 B시험편의 소성영역에서 나타난 신호로서 주파수 범위가 400~700kHz의 넓은 영역으로 나타났다. 이것은 B시험편은 다른 시험편과는 달리 경화능이 다른 B의 첨가에 의해서 기지조직이 마르텐사이트로 이루어져 있고, 항복점 이후의 영역에서 마르텐사이트내부 혹은 마르텐사이트와 구 오스테나이트 결정립 사이에서 균열이 발생하면서 나타나는 신호와 균열의 진전 및 탄화물의 분리 등에 의한 신호들이 동시에 검출되기 때문이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 화재 후 내화강의 재사용 여부를 평가하고자, 내열강의 열화처리 후 인장시험에 의하여 강도를 평가함으로써 구조물의 재사용 여부를 판단하고, 인장시험 중에 음향방출법을 도입함으로써 구조물 내부의 미시적인 변화와 음향방출과의 상관관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 열화온도에서 시간에 따른 인장강도의 산포는 어느 정도 존재하지만, 인장강도는 B시험편이 가장 높았으며, TN 및 T의 순서로 점차 낮게 나타났다.
- (2) 모든 시험편에 있어서, 열화온도에 따른 항복강도비와 항복강도 값이 건축구조용 내화강에서 요구하는 조건보다 높은 값을 알 수 있었다. 따라서 본 실험에서 사용한 재료는 화재 발생 후에도 사용 가능하다고 판단된다.
- (3) 인장시험 중의 음향방출거동은 모든 시험편에서 600℃-10min 이전까지는 항복점 부근에서 가장 많은 신호가 관찰되었고 그 이후에는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나, B 시험편의 경우에는 T 및 TN 시험편과는 다른 음향방출거동을 나타내었다. 즉, 항복점 이전에 1차 피크를 나타내고 항복점 이후에 2차 피크가 관찰되었다. 600℃-30min 이후의 모든 시험편에서는 항복점 이전의 탄성영역에서부터 큰 count를 갖는 신호들이 관찰되었고, 항복점 이후에는 점차 감소하는 경향을 나타내었다.
- (4) 전체적으로, 탄성영역에서 나타나는 count가 작은 신호들은 주로 전위의 이동에 의한 것으로 해석되고, 탄성 및 소성영역에서 나타나는 count가 큰 신호는 탄화물의 분리 혹은 intergranular delamination 등에 의한 신호라고 분석되었다.
- (5) 주파수 분석 결과, 탄성영역에서는 전위의 이동에 의하여 검출된 신호로 그 주파수 영역이 300~400kHz 사이로 나타났으며, 소성영역에서는 주로 탄화물 분리 등에 의하여 검출된 신호로 주파수 영역이 550~650kHz로 나타났다.

참 고 문 헌

- 伏見光雅, 計良光一郎, 力石 寛(1995). “建築耐火構造の開發”, 新日鐵技報, 第356号, pp. 31~37
- 谷 三郎, 金子康弘, 石黒守辛, 大浜通洋(1995). “鋼構造用鋼材-土木・建築構造用鋼材-”, NKK技報, 第150号, pp. 1~6
- 藤田 徹, 肥後裕一, 田中照夫, 浜中征一, 福村勝彦(1996). “輕量鐵骨構造建築物用耐火鋼材の諸特性”, 新日製鋼技報, 第74号, pp. 37~44
- 홍기정, 정희돈, 이종수(1995). “Al-Si 8090 합금의 소성변형 중의 음향방출 거동”, 대한금속학회지, 제33권, 제6호, pp. 806~813
- 이기안, 이종수, 정희돈(1996). “Al-Si 8090 합금의 미세조직 과 이방성에 따른 음향방출 거동”, 비파괴검사학회지, 제 16권, 제4호, pp. 215~224
- R. Yamashita, K. Yoshida, K. Sakamaki and K. Horikawa (1999). “Acoustic Emission Behavior During Tensile Deformation of NiAl Intermetallic Compound”, Proceedings of the Advanced Materials Development and Performance-Volume 2
- 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석(1999). “열화된 SUS 강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가”, 비파괴검사학회지, 제 19권, 제4호, pp. 270~276
- Ki-woo Nam, Kun-chan Lee, Jeong-hwan Oh(1999). “Application of Joint Time Frequency Analysis Methods of Nondestructive Evaluation”, AMD-vol.234/ NDE-vol.17, The 1999 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 14 - 19, 1999, Nashville, Tennessee, pp. 67~74
- 차귀준, 임만배(2000). “압력용기강의 파괴저항곡선과 파괴변형률에 관한 연구”, 한국해양공학학회지, 제14권, 제1호, pp. 44-51
- 허종희, 이종수(1997). “강 용접부의 소성변형시 음향방출 거동”, 대한금속학회지, 제35권, 제12호, pp. 1660~1667
- 강창룡, 성장현, 배동수(1999). “저항복비 및 고강도 구조용 내화강의 강도특성에 관한 연구”, 포스코 연구보고서, pp. 5~15