

## 저항복비 · 고강도 구조용 내화강의 피로특성 및 비파괴평가

김현수\* · 남기우\*\* · 강창룡\*\*

\*부경대학교 대학원 재료공학과

\*\*부경대학교 재료공학부

### Fatigue Characteristics and its Nondestructive Evaluation of Fire-resistance Steel for Construction with Low Yield Ratio and High Strength

H. S. Kim\*, K. W. Nam\*\* and C. Y. Kang\*\*

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

**Abstract** The fatigue test was carried out to evaluate the fatigue characteristics of fire resistance steel for frame structure and heat affected zone (HAZ) by the one side Gas Metal Arc Welding (GMAW). In this paper, the fatigue crack growth behavior was investigated with the compact tension specimen of base metal and the HAZ according to chemical composition and rolling end temperature, respectively. And the acoustic emission signals obtained from the fatigue test were analyzed by the time-frequency analysis method as a nondestructive evaluation. Main results obtained are summarized as follows; The hardness was appeared softening phenomenon that weld metal and HAZ are lower than that of base metal. Fatigue life of welded specimen was longer than that of base metal.  $m$  was 3~4.5 in base metal and 3.8~5.8 in HAZ. The main frequency range of acoustic emission signal analyzed from time-frequency method is different with the range by noise and crack. Also, it could be classified that it was also generated by fracture mechanics of dimple, inclusion etc.

(Received)

**Key words:** Fire resistance steel for frame structure, Fatigue Crack propagation rate, Gas metal arc welding, Heat affected zone(HAZ), Weld metal, Time frequency analysis, Acoustic emission

## 1. 서 론

최근 도심의 건축물은 토지와 공간을 보다 효율적으로 활용하려는 사회적 요구에 부응하려는 측면에서 초고층화 되어가고 있을 뿐만 아니라, 사용효율이 높은 실내 공간 확보 및 환경문제 등을 해결 위하여 철근콘크리트 구조에서 철골구조로 변화되고 있다. 더욱이, 최근의 강재는 기존의 강재보다 높은 강도 및 고성능(내진성, 용접성, 내화성 등)화와 같은 특수한 성질이 요구되고 있다[1-3]. 철골구조는 다른 건축구조에 비하여 건물자체의 자중이 적고, 높은 강도와 우수한 연성을 지니고 있기 때문에 내진성이 뛰어난 장점을 지니고 있다[4].

반복 하중을 받는 큰 구조물 내에서 크랙과 같은 결함은 피로균열성장으로 인해 갑작스런 파괴를 일으킨다. 특히, 용착금속과 열영향부는 용접과정이나 사용 중에 이러한 결함을 내포할 수 있다. 피로균열성장은 재료에 따라 그 특성이 다양하며 구조물의 설계나 보수,

관리상 중요하므로 각종 용접재에 대한 피로균열전파특성이 연구되고 있지만, 재료의 종류 및 용접조건 등에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다[5].

본 연구에서는 현재 널리 이용되고 있는 가스금속아크 용접(이하, GMAW)법으로 용접한 구조용 내화강의 열영향부(HAZ) 및 그 모재의 피로균열성장 특성을 검토하였다. 그리고, 피로균열진전시 검출된 음향방출신호의 주파수 특성을 파면과 비교함으로써 상관성을 규명하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험편 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편은 기존에 건축구조용 재료로 사용되고 있는 재료(A재료)를 기초로 하여 기계적 물성치를 향상시키기 위하여 합금 설계한 다음 진공용해하여 제조한 것이다. 즉, 건축 구조용 내화강의 탄소

**Table 1.** Chemical compositions of materials. (wt. %)

Spec.	C	Si	Mn	Mo	Ti	N	B
A	0.16	0.38	1.38	-	-	-	-
T	0.11	-	0.97	0.48	0.02	-	-
TN	0.11	-	1.04	0.48	0.018	0.015	-
B	0.12	-	1.16	0.49	-	-	>0.0144

**Table 2.** Mechanical properties of materials used.

Spec.	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
T	357	463	39.1
TN	378	534	34.2
B	622	686	22.5

**Table 3.** Welding conditions.

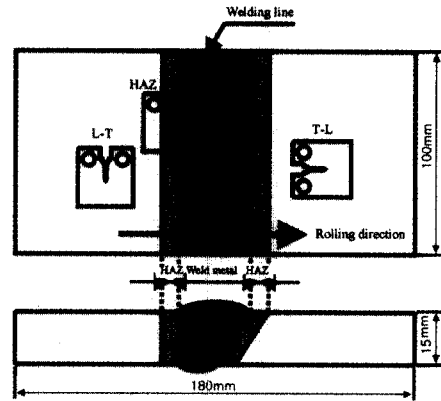
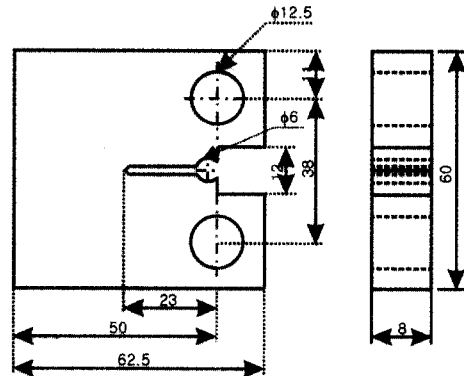
Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
27~28	150	22	11

함량(0.13~0.16)보다 탄소량을 약간 낮추는 대신에 Ti를 첨가한 것(이하, T로 명명), N과 Ti를 함께 첨가한 것(이하, TN으로 명명) 및 B를 첨가한 것(이하, B로 명명)이다. 재료의 화학조성은 Table 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

한편, 시험편의 압연시 압연종료온도변화는 미세조직의 변화를 초래하여 피로특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 압연종료온도에 따른 피로특성을 조사하기 위하여 첨가원소가 다른 세 가지 시험편을 1200°C로 가열한 후, 압연종료온도를 750°C와 950°C로 압연한 다음 공냉하여 피로시험을 실시하였다. 구조용강의 이방성에 따른 피로균열전파 특성을 평가하기 위하여 압연방향에 평행한 방향(TL방향)과 수직인 방향(LT방향)으로 노치를 기계·가공하였다. 각 시험편에 있어서 압연종료온도 750°C의 강재를 사용하여 TL방향 및 LT방향으로 제작한 시험편을 각각 75TL 및 75LT라고 부르고, 950°C의 강재를 95TL 및 95LT라 부르기로 한다. 또, 용접방법으로는 GMAW법을 선택하여, 3pass 용접하였다. 용접조건은 Table 3에 나타내었다. Fig. 1에 Groove의 형상과 시험편 채취위치를 나타내었다.

## 2.2. 미세조직 관찰 및 경도측정

시험편의 미세조직 관찰은 1% 니탈용액을 사용하여

**Fig. 1.** Orientation of CT specimen for fatigue test.**Fig. 2.** Dimension of fatigue specimen (Unit : mm).

부식시킨 후 광학현미경으로 관찰하였다. 합금원소 첨가 및 용접에 따른 미소경도값을 측정하기 위한 경도시험은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 500 gf의 하중에서 측정하였다.

## 2.3. 피로실험

피로시험은 최대용량 10톤의 만능피로시험기(Model : EHF-ED10, Shimadzu)를 사용하였으며, 실온에서 정현파를 이용하여 모든 시험편에 예비균열을 2 mm 형성시킨 후, 하중반복수 10Hz, 응력비  $R=0.1$ ,  $P_{max}=4.41$  kN의 일정하중으로 실시하였다. 균열길이는 clip gage를 이용한 컴플라이언스 법을 사용해서 측정하였으며, 응력 확대계수  $K$ 는 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 그리고 피로균열전파속도 ( $da/dN$ )는 얻어진  $\alpha-N$  선도에서 중분다항식법을 사용하여 구하였다. 이때 사용한 CT 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

$$K = \left[ \frac{P}{(B \cdot W)^{1/2}} \right] \cdot f(x) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{(2 + X)(0.866 + 4.64 \cdot X - 13.32 \cdot X^2 + 14.72 \cdot X^3 - 5.6 \times X^4)}{(1 - X)^{3/2}}, \quad (X = a/W)$$

여기서,  $a$ 는 균열길이,  $W$ 는 시험편 폭,  $B$ 는 시험편 두께,  $P$ 는 하중이다. 이 식은  $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다.

### 2.4. 음향방출 시스템

피로시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 피로시험에서 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-amp.에서 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 40 dB로 설정한 후 신호를 검출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 미세조직관찰

3종류의 시험편에서 얻어진 미세조직을 Fig. 4에 나타내었다. 이 조직사진에서 알 수 있는 바와 같이 T와 TN시험편에서는 페라이트의 기지조직에 소량의 펄라이트와 베이나이트가 공존하고 있다. 그러나 B시험편에서는 경화능이 큰 B의 첨가에 의해 마르텐사이트의 기지

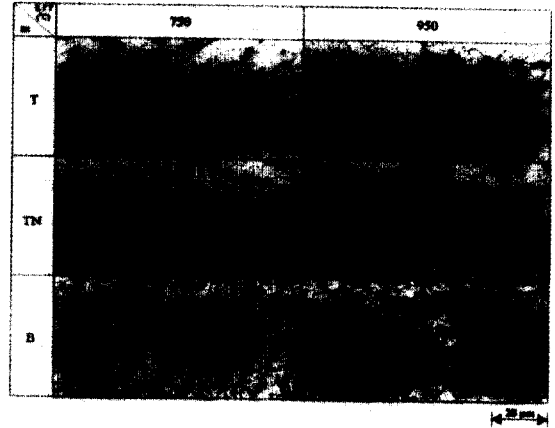


Fig. 4. Optical micrographs of specimen.

조직으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 모재, 용접열영향부 및 용착금속부의 현미경 조직을 나타내었다. T, TN 및 B시험편에 대하여 모두 조직을 관찰하였지만, 본 논문에서는 대표적으로 TN시험편을 나타내었다. Fig. 5(a)는 용착금속부(재가열 영역)의 미세조직을 나타낸 것으로, 전반적으로 침상형 페라이트와 구 오스테나이트 결정립계를 따라 형성된 초석 페라이트로 이루어져 있음을 알 수 있다[6]. Fig. 5(b)는 열영향부 조직으로서, 일반적으로  $A_3$  온도 이상으로 가열된 후 용착금속부보다 더욱 심한 급냉으로 인하여 본래의 결정립내에서 새로운 결정립이 발생하는 재결정으로 인하여 미세한 펄라이트가 입상으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 가속냉각형 TMCP 강재는 압연상태에서 열처리 재료에 상용하거나 보다 좋은 재질을 얻기 위해 개량된 강재이다. 제조과정시 물분사장치 등을 이용하여 오스테나이트 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서 냉각시키면서 압연하여 단위부피당 입계면적을 증가시킴으로서 많은 페라이트 핵생성 장소를 제공하여 결정립의 크기를 미세화 시킨다. 그리고 가속 냉각공정

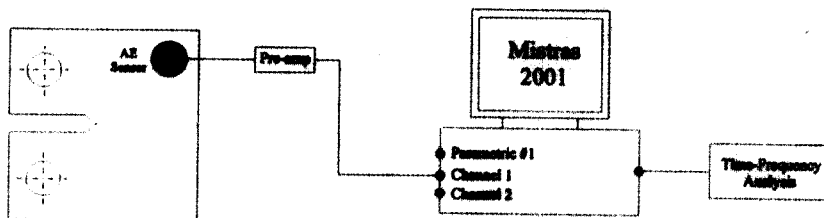


Fig. 3. Schematic diagram of AE system.

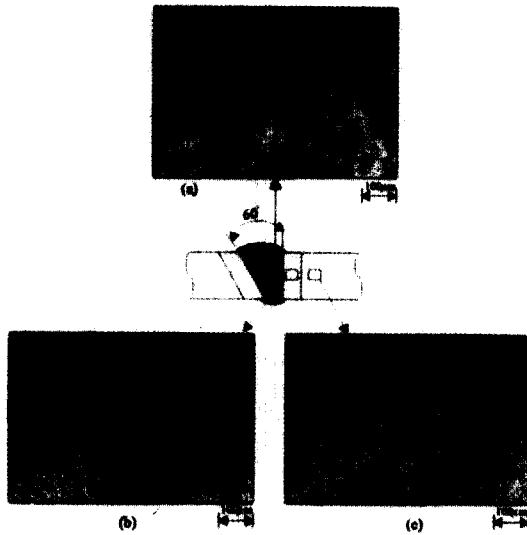


Fig. 5. Microstructure of the weld metal, HAZ and base metal; (a) Weld metal, (b) HAZ, (c) Base metal.

을 거쳐서 일부 베이나이트조직의 형성도 일어난다[7]. Fig. 5(c)은 모재의 미세조직을 나타낸 것으로 고속냉각 공정에 기인하여 펄라이트의 밴드 상을 없애주면서 미세한 페라이트조직에 일부 베이나이트조직이 복합된 형태의 조직으로 관찰되었다.

### 3.2. 경도시험

용접에 따른 경도값의 특성을 조사하기 위하여 마이크로 비커스 경도계를 이용하여, 용착금속부, 열영향부 및 모재에 대하여 순차적으로 측정된 경도값을 Fig. 6에 나타내었다. T 및 TN시험편에서는 용착금속부 및 열영향부가 모재와 비슷한 경도값을 나타내었다. 이것은 용접부의 인성개선과 열영향부 연화방지를 위하여 적절한 탄소량과 미량첨가원소의 영향이 효과적으로 작용하였다. 그리고, 열영향부는 용접열 사이클에 의하여 보다 안정된 조직으로 변태되었기 때문인 것으로 판단된다[7]. 또, B시험편의 경우에는 용착금속부와 열영향부가 모재보다 낮게 나타났다. 이것은, 일반적으로 고속냉각형 TMCP강재는 보다 우수한 특성을 얻기 위하여 제조과정에서 강화기구인 고속냉각공정을 거쳐서 결정립을 미세화 시킨다. 그 미세조직 상태는 항상 열역학적으로 준안정(metastable) 상태로 존재하기 때문에 용접시 용접 열사이클에 의하여 이러한 효과가 소멸되어 용접 열영향부의 강도를 저하시키는 연화현상이 일어나는 것으로 판단된다[8~9]. 이상의 세 시험편 모두 같은 고속

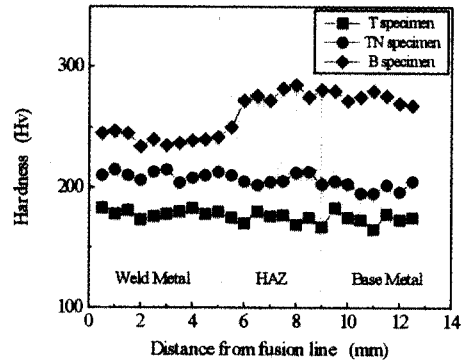


Fig. 6. Microvickers hardness of fire resistance for frame structure in GMAW process.

냉각공정을 거쳐 제조되었지만, 경도시험 결과가 같은 경향을 나타내지 않는 이유는 합금원소 첨가영향, 즉 각 시험편마다 합금원소를 조금씩 다르게 첨가하여 나타나는 결과로 판단된다.

### 3.3. 피로균열성장거동

Fig. 7은 고강도 구조용 내화강의 모재와 열영향부(HAZ)시험편에 대하여 피로시험을 실시한 후 얻은 피로 균열길이  $a$ 와 하중반복수  $N$ 과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 나타나는 것처럼 3시험편에서 모두 열영향부 시험편이 모재보다 피로수명이 길게 나타났다. 이 원인은 Fig. 6의 경도값 그래프에서 나타난 것처럼 본 실험에 사용한 재료의 용착금속부와 열영향부의 경도값이 모재와 비슷하거나 모재보다 낮게 나타나는 연화현상이 발생하였는데, 이것에 기인하는 것으로 판단된다. 열영향부(HAZ)시험편의 경우에 있어서도 모재의 경우와 마찬가지로 압연종료온도가 낮은 시험편의 피로수명이 더 길게 나타났다. 이것은 전보[13]에서도 나타나듯이 압연종료온도가 낮은 경우는 결정립의 크기가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또, 3종류 시험편 모두 압연종료 온도변화에 관계없이 피로균열성장방향에 압연방향에 평행한 시험편(TL)이 압연방향에 수직인 시험편(LT)에 비해 피로수명이 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 압연방향에 평행한 시험편은 압연에 의하여 기지조직인 페라이트와 펄라이트 조직이 대체로 압연방향을 따라 연신되어 있기 때문에 균열이 조직의 경계를 따라서 용이하게 전파하였기 때문이라 판단된다[18].

규칙적인 반복응력을 가했을 때 파괴가 발생하기까지의 응력반복수로 정의되는 피로수명은, B시험편이 가장

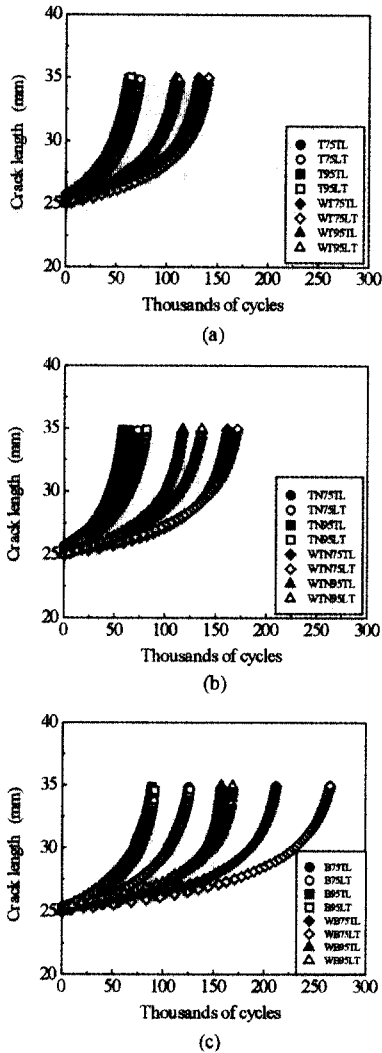


Fig. 7. a-N curves of base metal and heat affected zone for chemical composition and anisotropy; (a) WT specimen, (b) WTN specimen, (c) WB specimen.

길게 나타났고, TN, T시험편 순서로 나타났다. 일반적으로 강에서 질소의 첨가는 오스테나이트 안정화 원소이며, 고온에서의 페라이트 형성과 저온에서 마르텐사이트 형성을 억제한다고 알려져 있다. 또한 질소는 탄소를 비롯한 다른 원소보다 효율적인 고용강화원소이며, 기지인 오스테나이트의 적층결합에너지를 낮추어 평면전위 배열을 조정하여 효율적인 강화를 가져온다고 알려져 있다[10~12]. 따라서, TN시험편은 질소의 첨가에 의하여 T시험편보다 피로수명이 향상되었다고 판단된다. B 시험편이 T 및 TN시험편에 비하여 피로수명이 향상된

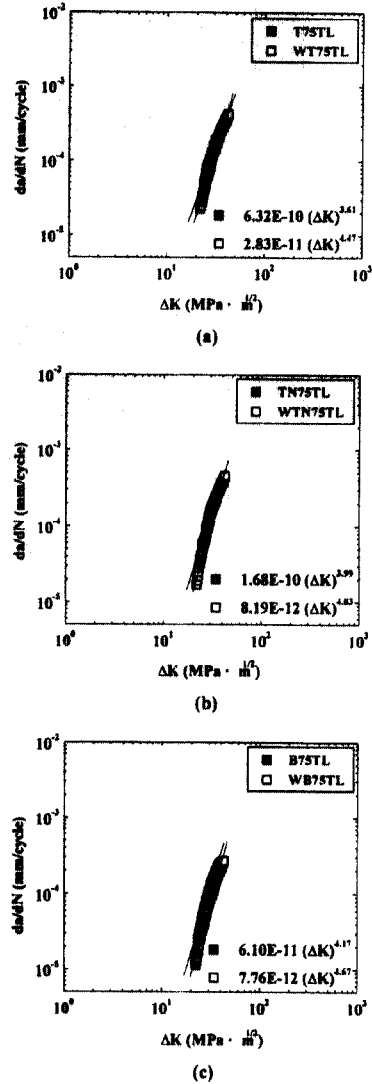


Fig. 8. Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range; (a) T specimen, (b) TN specimen, (c) B specimen.

이유는, B시험편의 경우는 경화능이 큰 붕소의 첨가에 의해 기지조직은 강한 마르텐사이트 조직으로 이루어져 있고, 여기에 미세한 석출물들이 피로균열의 전파를 방해했기 때문이라고 판단된다[5,13].

Fig. 8은 모재와 HAZ부의 피로균열성장속도 da/dN과 응력확대계수 변동폭 ΔK과의 관계를 나타낸 것이다. 모든 시험편에 대하여 비교하였지만, 본 논문에서는 대표적으로 각 시험편의 75TL시험편에 대하여 나타내었다. 이 그림에서 HAZ부의 피로균열성장속도가 모재보다 느

리게 나타났다. 이것은 미량 Ti, N, B 등의 성분을 함유하고 있는 가속냉각형 TMCP강재는 용접시 용접열 사이클 중에 안정한 질화물, 탄화물, 산화물 등을 모재에 미세분산시켜 열영향부의 오스테나이트 결정립 성장을 억제하고, 페라이트, 펄라이트 변태를 촉진시킨다. 그리고, 낮은 탄소당량 유지 및 용접재의 경우에도 매우 우수한 열영향부 인성을 가진다는 보고가 있다[7,15]. 또, Chung[16]은 열영향부의 조직이 모재에 비하여 조직의 미세구성이 복잡하게 변화되어 균열의 전진경로가 불규칙하기 때문에 열영향부의 피로균열전파가 늦다고 보고하였다. 본 연구에서도 이와 같은 이유들에 의하여 열영향부의 피로균열전파속도가 모재보다 늦게 나타난다고 판단된다.

그리고, Fig. 8에는 Paris법칙에 의한 용력확대계수와 피로균열전파속도와의 관계식을 나타내었다. 이들 식에서 얻어진  $m$ 과  $C$ 와의 사이에는 Fig. 9 같이 매우 안정된 관계가 있다. 이것을  $C = \frac{A}{B^m}$ 으로 나타내면  $A = 32$ ,  $B = 6.36 \times 10^6$ 이다. 즉,  $m$ 과  $C$ 사이에는 반비례의 관계가 성립하며  $m$ 이 클수록  $C$ 가 적어지는 경향을 보이고 있다.  $m$ 이 크다는 것은 고연성 또는 연질의 재료를 의미하며,  $C$ 값은 재질의존성을 나타낸다[17]. 본 연구에서 얻어진  $m$ 값은 모재의 경우에는 3~4.5 사이의 값을 나타내고 있고, HAZ부의 경우에는 3.8~5.8사이의 값을 나타내었다.

피로균열의 용접열영향부 전파상태를 확인하기 위하여 각 시험편에 대하여 파면사진을 조사하였다. 본 논문에서는 대표적으로 WT95시험편의 파면 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 이 사진에서 나타나는 것처럼 피로균열이 용접열영향부를 따라서 전파한 것으로 나타났다.

### 3.4. 파면해석

Fig. 11는 피로실험 후 파면을 주사전자현미경으로 관찰한 것을 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 괄호안의 숫자는 파면사진을 관찰한 위치를 나타낸다. Fig. 11에서 화살표 방향은 피로균열전파 방향을 나타낸다. Fig. 11(a), (b) 및 (c)는 각각의 시험편에 대하여 피로균열전파 길이에 따라 나타낸 것이다. 파면은 피로파괴의 전형적인 형태인 스트라이에이션이 관찰되었다. 또 개재물의 파괴 등도 관찰되었다. 이런 개재물의 파괴를 보다 자세히 관찰한 것을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)은 WT95시험편에서 피로균열전파 길이가 31 mm 일 때 관찰된 것으로서 피로균열이 강한 개재물을 관통

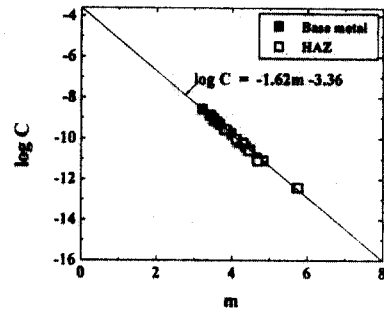


Fig. 9. Relationship of  $m$  and  $C$  of the Paris-equation for fire resistance for frame structure.



Fig. 10. Fractography of WT specimen.

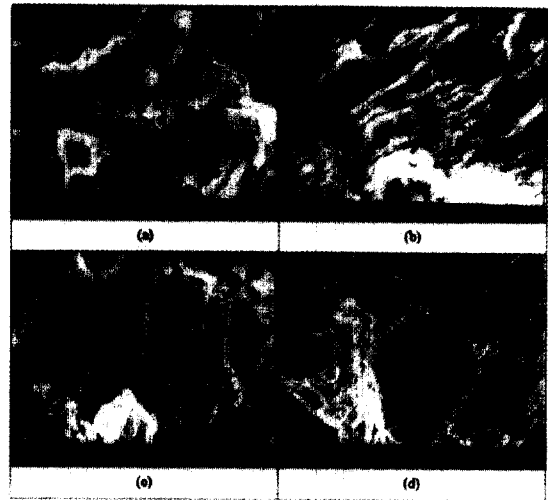


Fig. 11. Fractography of each specimen; (a) WT75 ( $a=25$ ), (b) WB95 ( $a=31$ ), (c) WTN75 ( $a=35$ ), (d) Inclusion [WB95 ( $a=35$ )].

하지 못하고 우회하여 전파한 것을 알 수 있다. Fig. 12(b)은 WT75시험편에서 피로균열전파 길이가 35 mm 일 때 관찰된 것으로, 피로균열이 개재물을 관통해서 전파한 것을 알 수 있다. 이런 개재물들이 피로균열의

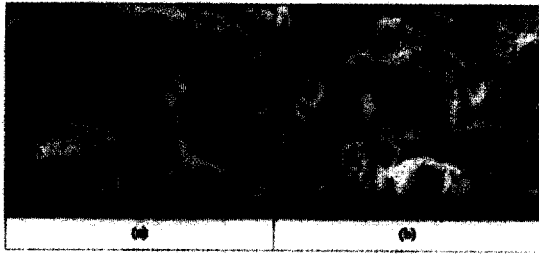


Fig. 12. Fractography of fatigue crack and inclusion; (a) WT95(a=31), (b) WT75(a=35).

전파를 지연시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.5. 주파수 분석

피로균열전파에 따른 음향방출신호의 검출은 모든 시험편에 대해서 피로균열이 2mm전파할 때마다검출하였지만, 본 논문에서는 대표적으로 Fig. 11의 파면사진에 나타난 피로균열전파 길이, 즉 25 mm, 31 mm 및 35 mm일 때 검출된 신호를 시간-주파수해석법으로 분석하여 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13(a)는 균열전파가 없는 상태에서 검출된 신호로서, 주파수 분석결과 주파수 영역이 200kHz 이하의 영역으로 나타났다. 이것은 기계적 혹은 전기적 잡음 등에 의한 노이즈로 판단된다. Fig. 13(b)~(d)는 Fig. 11(a)~(c)와 같은 조건에서 검출된 신호를 분석한 것이다. 압연종료 온도와 합금첨가원소에 상관없이 모든 시험편의 피로균열이 전파할 때 검출된 신호로서, 그 주파수 영역이 200~400kHz로 나타났다.

피로시험 중에 200~400kHz 영역에서 나타나는 음향방출신호 이외에 높은 주파수를 갖는 신호를 분석하여 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14(a)은 WT95시험편에서 균열길이가 31 mm일 때 검출된 신호를 분석한 것으로서 그 주파수 영역이 200~400kHz와 550~600kHz로 2개로 나타났다. 이것은 Fig. 12(a)에서 나타나는 것처럼 피로균열이 개재물을 우회할 때 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 200~400kHz영역은 피로균열의 전파에 의해서 나타나는 것이고, 550~600kHz영역은 개재물을 우회할 때 검출된 것이라고 판단된다. Fig. 14(b)는 WT75시험편에서 피로균열길이가 35 mm일 때 검출된 것으로서, 중심주파수가 550kHz로 피로균열전파시 발생하는 것보다 높게 나타났다. 이것은 Fig. 12(b)의 파면 사진에서 나타나는 것처럼 피로균열길이가 35 mm 근방에서 개재물이 존재하고 있어서, 피로균열이 개재물을

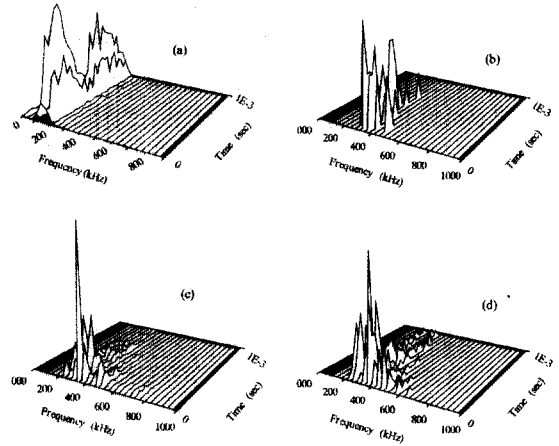


Fig. 13. Time-frequency analysis for each crack length; (a) Noise, (b) WT75 (a=25), (c) WTN75 (a=31), (d) WB95 (a=35).

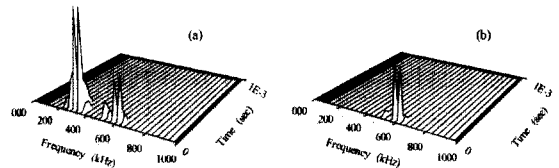


Fig. 14. Time-frequency analysis for high frequency abrupt signal; (a) crack and inclusion, (b) inclusion.

관통하는 순간에 검출된 신호라고 판단된다[13].

4. 결 론

본 연구에서는 가스금속아크용접(이하, GMAW)법으로 용접한 구조용 내화강의 열영향부(HAZ) 및 그 모재의 피로균열성장거동 및 피로실험에 음향방출법을 도입하여 적용가능성을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 용접부의 경도시험결과 용착금속부 및 열영향부의 정도값이 모재보다 낮게 나타나는 연화현상이 관찰되었다.
- (2) 용접한 시험편의 피로수명이 모재보다 더 길게 나타났다. 이것은 용착금속부와 열영향부에서 나타나는 연화현상 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 압연종료온도 및 합금첨가원소에 상관없이, 모든 시험편에 대해서 열영향부의 피로균열전파속도가 모재보다 늦게 나타났다.
- (4) Paris식의 기울기를 결정하는 m값은, 모재의 경우는 3~4.5 사이의 값을 나타내었고, HAZ부의 경우에는

3.8~5.8사이의 값을 나타내었다.

(5) 검출된 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과, 200kHz 이하의 잡음영역과 피로균열전파에 따른 주요 주파수 영역(200~400kHz)을 구별할 수 있었다.

(6) 시간-주파수 해석법으로 개재물의 분리 등의 복합적인 파괴기구에 의해서 발생하는 주파수 영역(550~600kHz)도 분류 가능하였다.

### 참고문헌

1. 中村秀司, 吉川秀章, 大失俊樹, 丸山 榮, 穂 實: 新日鐵技報, 第356号 (1995), pp. 47~53.
2. 伏見光雅, 計良光一郎, 力石 寛: 新日鐵技報, 第356号 (1995), pp. 31~37.
3. 谷 三郎, 金子康弘, 石黒守幸, 大浜通洋: 新日鐵技報, 第150号 (1995), pp. 1~6.
4. 藤田 徹, 服後裕一, 田中照夫, 浜中征一, 福村勝彦: 新日鐵技報, 第74号 (1996), pp. 37~44.
5. 이종수, 고광진, 강인창: 대한금속 · 재료학회지, 제26권, 제2호 (1988), pp. 178~185.
6. 정현호, 김길만, 김우식: 대한금속 · 재료학회지, 제36권, 제5호 (1998), pp. 785~787.
7. 이택순, 오대석, 이휘원: 한국해양공학회지, 제11권, 제3호 (1997), pp. 39~47.
8. 이택순, 이휘원, 김영철: 한국해양공학회지, 제10권, 제3호 (1996), pp. 14~23.
9. T. Mohands, G. Madhusudan Reddy and B. Satish Kumar: Journal of Materials Processing Technology, 88 (1999), pp. 284~294.
10. F. B. Pickering: Journal of Foct and Hendry, Lille, France, The Institute of Metals, London 92 (1989).
11. 이태호, 정윤철, 김성준: 대한금속 · 재료학회지, 제37권, 제4호 (1999), pp. 400~408.
12. 김대환, 류우석, 김우근, 국일현: 대한금속 · 재료학회지, 제37권, 제5호 (1999), pp. 539~942.
13. 김현수, 남기우, 강창룡: 대한금속 · 재료학회지, 제38권, 제11호 (2000), pp. 1478~1482.
14. 한승호, 김정규: 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제10호 (1997), pp. 1694~1701.
15. K. Tsukada, T. Ohkita, C. Ouchi, T. Nagamine, K. Hirabe and K. Yako: Nippon Korean Technical Report Overseas No. 53 (1982).
16. 정세희, 김태영, 나익근: 대한용접학회지, 제6권, 제2호 (1988), pp. 56~63.
17. 北川英夫: 材料, 第26卷, 第284号(1977), pp. 482~493.
18. 이상기, 도재윤, 남기우, 강창룡, 이해우, 안석환: 한국해양공학회지, 제4권, 제2호 (2000), pp. 65~69.