

철도차량 구조물용 연강(SM490A)의 기계적 내한 특성 연구

A Study on the Low Temperature Mechanical Characteristics of SM490A for the Railroad Vehicle Structure

김재훈[†] · 강기원* · 구병춘** · 유원희**

J. H. Kim · K. W. Kang · B. C. Goo · W. H. You

Abstract

This study investigates the effects of the material properties and the fatigue behavior in the SM490A material specimens due to the low-temperature atmosphere. In the fatigue behavior, the low-temperature affects the fatigue life. As the temperature get low, the fatigue limit increase, also As the yield strength and the tensile strength increase, the impact absorbed energy decrease. The difference of fatigue life represents to normal distribution and it is larger between the room temperature and the low temperature, but in the result of the cumulative density function, the effect of temperature is not too large on it.

Keywords : Low temperature(저온), Fatigue life(피로수명), Mechanical properties(기계적 물성치)

1. 서론

철도차량과 같이 피로하중이 연속적으로 작용하는 구조물의 설계에 있어서는 구조물의 사용 환경 및 재료의 피로 특성을 동시에 고려해야 하는 특성이 있다[1]. 이로 인해 대부분의 파손이 용접부에서 발생하고 있다. 이 때문에 피로설계 기준이 필요하며, 독일[2], 일본[3], 미국[4] 등은 피로설계를 위한 자체 규정을 보유하고 있으며, 국내의 경우에도 철도차량의 피로설계 기준에서 구조재료의 피로특성 데이터를 제시하고 200만회 반복하중에서 견딜 수 있는 응력조건을 설계응력으로 정하고 있다.

한편 최근의 국제화 추세에 따라 철도 수송은 지역간 수송에서 대륙간 수송으로 그 영역이 확장되고 있다. 이에 대한 대표적인 예가 시베리아 횡단 철도(TSR)등을 들 수 있으며 이러한 요구에 따라 철도차량은 기존의 지역간 수송에서 쉽게 접하지 못했던 다양한 환경조건 즉 저온 환경하에서 운행되는 경우가 있다.

그러나 금속재료는 저온 환경하에서 인성(toughness) 등이

저하되어 취약해지는 특성이 있다[5]. 따라서 저온 환경과 같은 극단적인 환경하에서 철도 차량의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 철도차량 구조재료의 저온 특성에 대한 연구가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 철도 차량의 핵심 구조인 대차 프레임에 적용되는 SM490A 재료의 정적강도, 피로 및 충격특성에 미치는 저온 환경의 영향을 평가하였다. 이를 위하여 상온(+20°C) 및 저온(-10°C, -40°C)에서의 정적인장, 피로 및 충격 시험을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 시험 방법

2.1.1 재질 및 시편

본 연구에서 사용한 재료는 철도차량의 대차 프레임 및 차체 구조 재료로 사용되는 SM490A[6]로서 이를 대상으로 하여 인장시험편, 피로시험편 및 샤피 충격시험편을 제작하였다. 인장시험편은 ASTM E8[4]에 따라 제작하였으며 피로시험편과 충격시험편은 각각 ASTM E 466[7] 및 KS B 0809[9] 규격에 따라 제작하였다. 단, 여기서 KS B 0809[9]에 따른 충격시험편은 시험의 용이성 및 시험기 용량 등의 이유로 인하여 V-노치 축소 시험편을 제작하였다. Fig. 1은 각각의 시험편에 대한 도면이다.

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : lapin95@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5279

* 회원, 체육과학연구원, 스포츠산업실

** 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

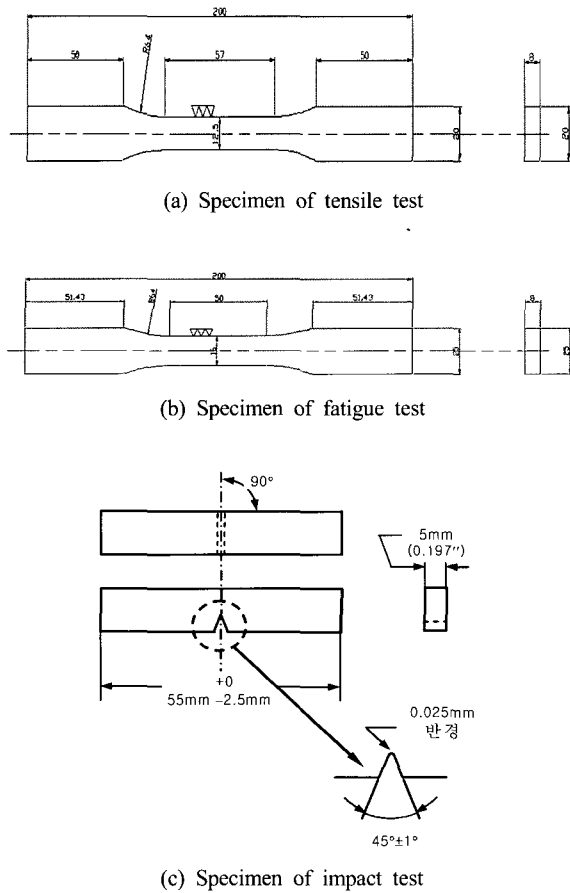


Fig. 1. Test specimens

2.1.2 정적인장시험

재료의 기계적 물성치를 평가하기 위하여 Instron 사의 서보 제어식 유압시험기(model 8801)를 이용하여 ASTM E8M[4]에 따른 인장시험을 실시하였다. 시험속도는 변위제어하의 2 mm/min 이며, 시편의 평행부에 Gage length=50mm인 Extensometer 를 부착하여 시편이 파단될 때까지 변형율을 측정하였다. 시험이 진행되는 동안 하중, 변위, 변형률 신호를 controller를 통하여 PC에 연속적으로 기록하였다. 또한 본 연구의 주요 목적인 SM490A 재료의 온도 의존성을 평가하기 위하여 액체질소를 냉매로 사용하는 저온챔버를 사용하였다. 이때 시험편의 열평형을 보장하기 위하여 시험편은 시험요구온도에서 시험전 3시간 이상 유지하였다. 시험편의 수량은 각 온도 조건 즉, 20℃, -10℃ 및 -40℃에서 각각 7개씩을 준비하였다.

2.1.3 일축 인장 피로시험

일축 인장 피로시험은 ASTM E 466[7] 및 JSME S 002[8]에 따라 시험을 실시하였다. 시험 장비로는 Instron model

8801을 사용하였으며 피로시험에 앞서 하중, 변위 및 변형율에 대한 calibration을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였으며, 모든 시험의 제어 및 데이터의 처리, 결과 해석은 PC를 통해 수행하였다. 일축 인장 피로시험은 온도조건에 따라 각각 20개씩 준비된 시험편을 대상으로 수행하였으며 적은 수의 시험편으로 신뢰성 높은 데이터를 획득하기 위하여 14SN 법에 기초한 시험 조건을 설정하여 수행하였다[8]. 또한 시험편이 200만회의 피로하중을 받은 후에 파단되지 않을 경우에는 무한 수명으로 간주하고 시험을 중지하였다. 시험시의 속도는 25Hz, 응력비의 경우 R=0.1로 설정하였다.

2.1.4 충격시험

충격시험은 사피 충격시험기(오리엔탈, OTC300)를 이용하여 수행하였다. 시험편은 KS B 0809의 충격시험편을 선정하였으며 압연 및 압연 직각 방향으로 각각 9개 및 6개의 시험편을 준비하여 각 시험온도에 따른 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 정적 인장특성 평가

SM490A 재료의 온도 의존성을 평가하기 위하여 3종류의 온도 조건(+20℃, -10℃ 및 -40℃)에서 7회의 인장시험을 각각 실시하였다. Fig. 2는 이러한 인장시험으로부터 구한 응력-변형률 선도를 온도 조건별로 나타낸 것이다. 그림으로부터 SM490A 재료는 데이터의 산포 현상이 거의 발생하지 않고 있으며 이러한 현상은 온도와 관계없이 유지됨을 알 수 있다. 또한 응력-변형률 거동은 온도의 영향을 받아 약간 상승하고 있음을 알 수 있다. 이러한 거동은 온도의 저하에 따라 재료가 취성화하면서 강도가 약간 증가되기 때문이라고 판단된다. 항복강도의 경우 상온조건하에서의 결과에 비하여 -10℃ 및 -40℃의 저온조건하에서의 실험결과는 각각 3.3% 및 7.1% 증가한 것으로 나타내고 있다. 또한 인장강도의 경우는 저온조건하에서 각각 4.7% 및 7.8% 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향의 원인은 위에서 설명한 바와 같이 온도 저하에 따른 재료의 취성 강화로 판단된다. 한편 변형률의 경우 온도의 저하에 따른 재료 취성의 강화로 인하여 변형률이 저하될 것으로 판단되었으나 오히려 1%내외의 증가를 보이고 있다. 그러나 그 증가폭이 매우 작아 온도의 영향으로 인한 것으로 판단하기는 곤란하며 재료 자체의 변동성에 기인하는 것으로 판단된다. 이에 대한 근거로서 항복강도 및 인장강도의 경우는 특정 온도의 데이터가 다른 시험온도의 데이터와 중복되는 현상이 발생하고 있지 않지만 변형률의 경우는 중복 현상이 발생하고 있음을 들 수 있다.

이상의 결과로부터 온도의 저하에 따라 항복 및 인장강도가 일정부분 상승하는 취화 현상으로 나타나고 있지만 이와 반대로 취화 현상의 대표적 지표 중의 하나인 변형률은 거의 변화가 없으므로 SM490A 재료의 인장특성에 대한 온도의 영향은 미미한 것으로 판단되며 이를 보다 명확히 평가하기 위해서는 향후 파면 관찰 등의 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 피로수명 및 피로한도 특성평가

구조물에 작용하는 실제 하중하의 피로수명을 평가함에 있어서, 이의 수명을 비교 및 검토하기 위해서는 일정진폭하의 피로수명에 대한 평가가 일차적으로 요구된다. 특히 임의의 피로수명에 따른 피로강도의 예측이 기계·구조물의 안전성과 경제성 측면에서 크게 요구되는 사항이다. 부하 응력진폭 σ_{amp} 와 피로수명 N_f 와의 관계는 양대수(log-log) 그래프 상에 나타내면, 이의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{amp} = AN_f^B \quad (1)$$

여기서 A, B는 재료상수이다.

Fig. 3은 SM490A 재료에 대한 응력진폭 대 피로수명 시험 결과와 식 (1)에 의한 예측수명을 시험 온도조건별로 나타낸 것으로서 그림에서 알 수 있듯이 SM490A 재료의 피로수명은 시험온도에 관계없이 식 (1)의 형태로 잘 근사되며 이로부터 본 실험에 의하여 구해진 피로수명은 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 참고로 각 시험 온도에 대한 재료상수 A, B의 값은 Table 1에 나와 있다.

한편 시험 온도조건 즉 +20°C, -10°C 및 -40°C에서 평가된 피로한도는 각각 170.7MPa, 180.7MPa 및 184.22MPa로 평가되어 온도 저하에 따른 피로강도 및 한도의 증가현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 온도 저하에 따라 SM490A 재료의 항복강도 및 인장강도가 증가되는 현상과 동일하다고 판단된다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 유한수명 영역 즉 경사부에서는 온도의 저하에 따른 피로강도의 증가현상이 나타나고 특히 이는 고수명 영역에서 보다 명확히 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 온도 저하에 따라 S-N 곡선의 기울기가 완만해지는 현상에 반영되고 있다. 이와 같이 온도가 저하됨에 따라 피로강도 및 피로한도가 증가되는 현상은 재료취화에 따라 항복강도 및 인장강도가 증가되는 현상에 기인한다고 판단된다.

3.3 확률론적 특성을 고려한 피로선도 평가

구조 재료에는 고유의 불균질성 및 손상의 분산성 등이 존재

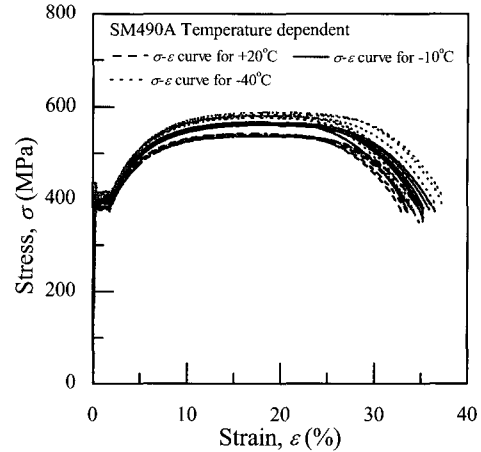


Fig. 2. Stress-strain curve (overall)

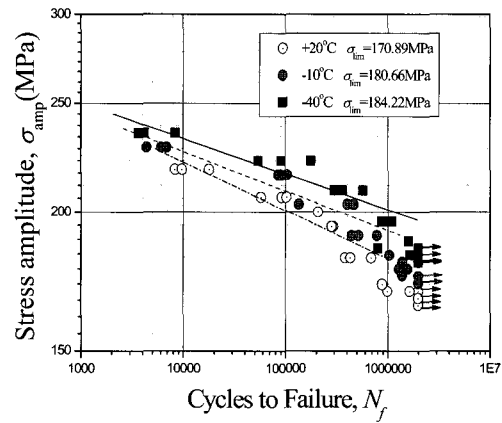


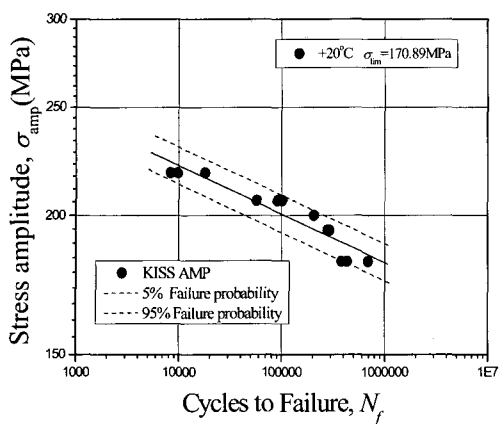
Fig. 3. S-N curves for SM490A (overall)

Table 1. Material properties in Eq. 4.1

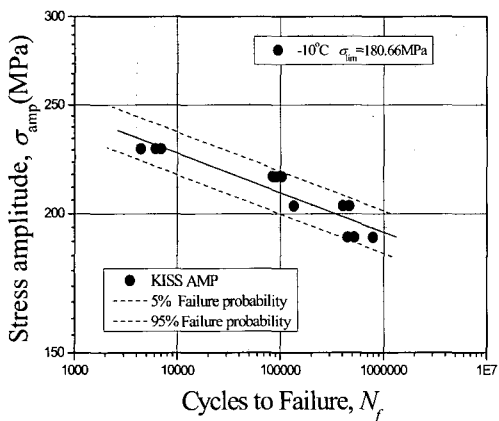
	A	B
Room temperature +20°C	329.85	-0.04322
Low temperature -10°C	313.16	-0.03524
Low temperature -40°C	311.54	-0.03176

하므로 이의 피로강도 및 수명을 평가하기 위해서는 확률론적 특성을 고려한 확률 P에 대한 probabilistic S-N curve(P-S-N 선도, S:응력, N: 수명)의 도입[8]이 중요하다. P-S-N 선도는 양대수(log) 크기 좌표에서 정리한 1차식 $\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S$ 을 확률 50%의 P-S-N 선도로 보고, 식 (2)와 같이 경사부 피로수명에 대하여

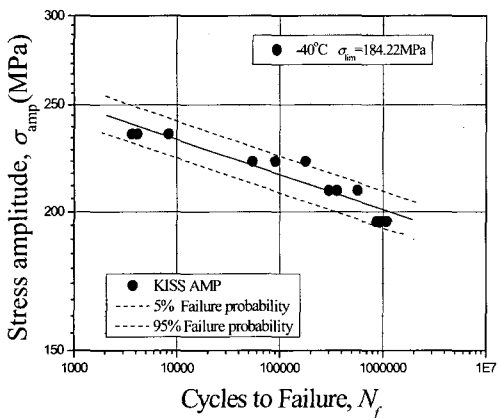
$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \pm 1.64\hat{\sigma}(\log N) \quad (2)$$



(a) P-S-N curve for room temperature +20°C



(b) P-S-N curve for low temperature -10°C



(c) P-S-N curve for low temperature -40°C

Fig. 4. P-S-N curves for SM490A

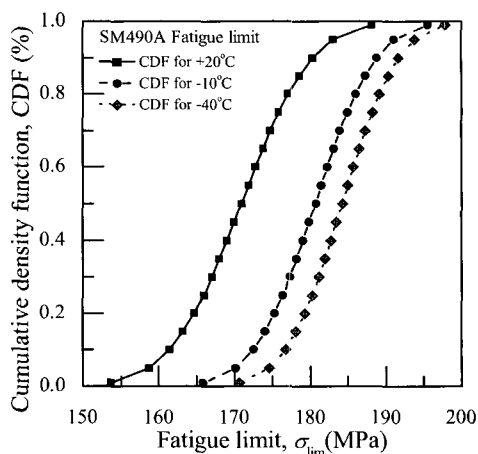


Fig. 5. CDF for fatigue limit

표준편차 $\pm 1.64\hat{\sigma}(\log N)$ 만큼 평행 이동하여 5%, 95%에 해당하는 P-S-N 선도를 구한 것으로 이를 Fig. 4에 나타내었다. 이때, $\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2$ 는 1차식의 계수이다. Fig. 4에서 보듯이 본 연구의 P-S-N 선도는 실험결과의 분산을 잘 나타내고 있으며 대부분의 피로시험 결과들이 5%~95%의 범위 안에 포함되어 있다. 그리고 이러한 경향은 시험 온도 조건과 관계없이 일정함을 알 수 있다. 또한 P-S-N 선도의 수평부인 피로한도 \hat{S}_w 역시 식 (3)을 이용하여 피로한도의 분산성을 조사하여 Fig. 5에 나타내었다.

$$\text{수평부} : \log \hat{S}_w = \log \hat{S}_w \pm \frac{1.64}{|\hat{\beta}_2|} \hat{\sigma}(\log N) \quad (3)$$

이 경우에도 경사부 방법과 마찬가지로 표준편차 $\pm \frac{1.64}{|\hat{\beta}_2|} \hat{\sigma}(\log N)$ 만큼 평행 이동하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 피로한도의 분산성은 정규분포에 의하여 묘사될 수 있음을 알 수 있다.

한편 앞에서 설명한 바와 같이 시험온도의 변화는 SM490A의 인장 및 피로특성에 영향을 미치고 있다. 이러한 시험온도의 변화로 인하여 피로수명의 변동성 역시 변화되는가를 확인하기 위하여 식 (2)에서 파손확률에 따른 피로수명의 값을 나타내는 항을 랜덤변수화 하였다. 이와 같이 처리된 랜덤변수는 실험결과와 식 (1)에 의한 예측값의 차이를 나타내며 이러한 물리적의미를 갖는 랜덤변수의 누적분포값을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피로수명의 변동성은 정규분포에 잘 근사되고 특히 이들의 변동성은 상온조건에 비하여 저온조건하에서 비교적 크게 평가되거나 저온 조건하에서

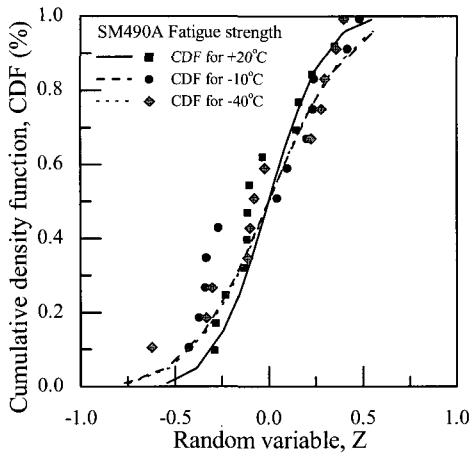


Fig. 6. CDF for fatigue life

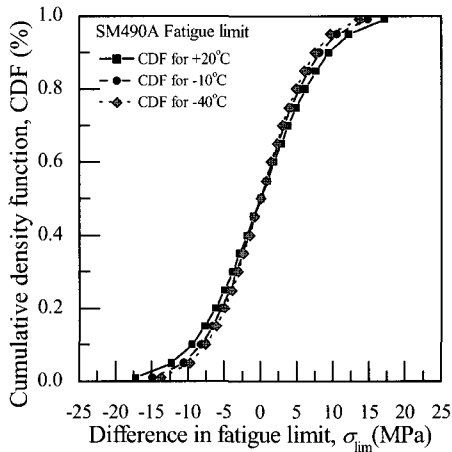
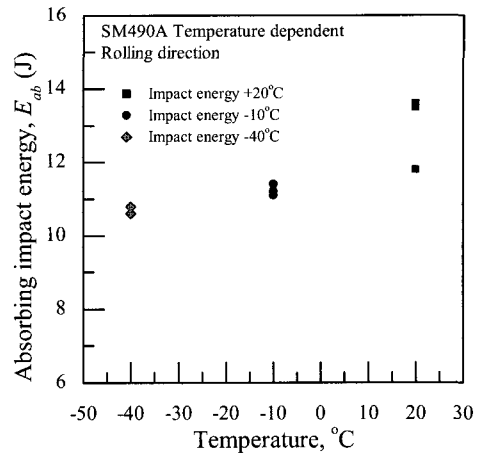
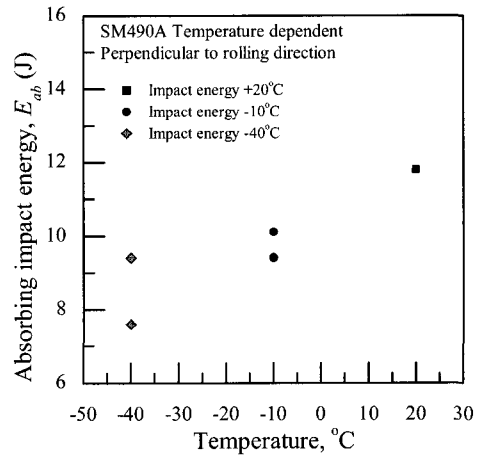


Fig. 7. CDF for difference in fatigue limit



(a) For rolling direction



(b) For perpendicular to rolling direction

Fig. 8. Impact absorbed energy

의 변동성은 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 온도 변화에 따른 피로한도의 변동성 변화를 평가하기 위하여 식 (3) 등을 이용하여 피로한도의 변화값을 랜덤 변수화하고 이에 따른 누적 분포값을 구하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피로한도의 변동성은 온도의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

3.4 충격 특성평가

앞서 설명한 바와 같이 SM490A 재료의 인장 및 피로특성에 대한 온도변화는 일정 부분 존재함을 알 수 있었다. 그러나 금속재료의 온도 의존성을 가장 잘 설명할 수 있는 매개변수는 진자형 시험기를 이용한 충격시험이다[9]. 본 연구에서는 SM490A 재료의 온도 의존성을 명확히 평가하기 위하여

Charpy 충격시험편을 이용한 충격시험을 시험 온도 조건에 따라 수행하였다. Fig. 8은 이의결과를 나타낸 것으로서 압연 및 압연직각 방향에 대한 충격흡수에너지(impact absorbed energy)를 각각 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 SM490A 재료의 충격흡수에너지는 온도 저하에 따라 서서히 감소하며 이러한 경향은 시험편 채취방향과 무관하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 시험편 채취방향에 따른 충격흡수에너지를 평가 하면 압연직각방향의 경우가 압연방향에 비하여 저하율이 높음을 알 수 있으며 이러한 현상은 김종택[10] 등이 보고한 경향과 일치한다. 다만, 압연강재에 대한 규격인 KS D3515를 살펴보면 충격흡수에너지에 대한 규정 값이 존재하지만 이 값은 강재의 두께가 12mm이상일 경우만 해당하는 값이다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도차량의 대차 및 차체에 사용되는 재질과 동일한 SM490A 재질에 대하여 정적강도, 피로 및 충격특성에 미치는 저온 환경의 영향을 연구하였다.

- (1) 정적 인장특성 평가결과 SM490 재질은 온도의 저하에 따라 항복 및 인장강도가 일정부분 상승하는 취화 현상으로 나타나고 있지만 이와 반대로 취화 현상의 대표적 지표 중의 하나인 변형률은 거의 변화가 없다.
- (2) 피로특성 평가결과 시험 온도 +20℃, -10℃ 및 -40℃에서 평가된 피로한도는 각각 170.89MPa, 180.66MPa 및 184.22MPa로 온도 저하에 따른 피로강도 및 한도의 증가 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 피로수명의 변동성은 정규분포에 잘 근사되고 특히 이들의 변동성은 상온조건에 비하여 저온조건하에서 비교적 크게 평가되나 저온 조건하에서의 변동성은 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 피로한도의 변화값을 랜덤 변수화하고 이에 따른 누적 분포값을 구한 결과 온도 변화에 따른 피로한도의 변동성 변화는 온도의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.
- (3) 온도 의존성을 가장 잘 설명할 수 있는 매개변수인 충격 시험결과, SM490A 재료의 충격흡수에너지는 온도 저하에 따라 서서히 감소하며 이러한 경향은 시험편 채취방향

과 무관하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 시험편 채취방향에 따른 충격흡수에너지를 평가하면 압연직각방향의 경우가 압연방향에 비하여 저하율이 높음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. B.N. Park, K. H. Kim, H.K. Kim, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference Model," KSR, Vol.5, No.2, pp.118-124, 2002
2. DV 952. (1977). "Vorschrift für das Schweißen metallischer Werkstoffe in Privatwerken."
3. JIS E 4207. (1992). "Truck Frames for Railway Rolling Stock-General rules for Design."
4. ASTM E8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials."
5. 김정규, 최낙삼, 김태원 : 기계재료학, 2005
6. KSA, 2004, KS D 3515 "용접 구조용 압연 강재"
7. ASTM E466, "Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials"
8. 일본기계학회 1994, "統計的 披露 試驗 方法" JSME S 002-1994 pp.1-61
9. KSA, 2001, KS B 0809 "금속 재료 충격 시험편"
10. 김종락, 박향희, 2003, "SM490A TMC 후판강재의 소재 및 용접부 특성에 관한 연구," 한국강구조학회 논문집, 제15권 제3호, pp.331-339