

한국형 고속전철 객차 연결장치의 피로강도 평가

노규석* · 이상록* · 강재윤*

Fatigue Strength Evaluation of KHST Gangway

Kyu-Seok Rho, Sang-Rok Lee and Jae-Youn Kang

Key Words : Fatigue Strength(피로강도), Carrying Ring(운반링), Fixed Ring(고정링), Modified Goodman Diagram(수정Goodman 선도)

Abstract

A FEM-based analytical approach was used to evaluate the fatigue strength of a KHST gangway. A KHST gangway was made of AC4C, 5083-O, 6005A-T6 aluminum alloys. The fatigue strengths of them were obtained from the related code and literatures. The effect of tensile mean stress was taken into account by the modified Goodman diagram, but the effect of compressive mean stress was not considered. There was not any location of a KHST gangway that exceeded the allowable fatigue strengths.

기호설명

$\Delta\sigma$: 응력범위
 σ_a : 응력진폭
 R : 응력비
 σ_m : 평균응력
 σ_u : 인장강도

1. 서론

최근 철도차량에 대한 알루미늄 합금의 적용이 현저히 증가하고 있는 실정이다. 이는 알루미늄 합금이 기존의 Steel 이나 Stainless Steel에 비하여 철도차량을 경량화 하는데 이점이 있으며, 이로 인하여 에너지 절감 및 유지보수비의 절감을 가져 오기 때문이다.

일본의 경우 동경과 신 오사카 사이를 운행하고 있는 Nozomi의 경우 알루미늄합금 압출 형강재의 도입으로 기존의 Steel 차량에 비해 25%의 중량을 감소시킴으로써 운행속도의 증가와 주행시간을 크게 단축하였다고 보고하고 있다⁽¹⁾.

유럽의 경우 1988년 이전까지는 지하철 및

통근열차에 알루미늄 합금이 널리 사용되어 오다가 1980년대 말부터 독일의 ICE를 중심으로 고속전철 등에도 널리 이용되고 있다⁽²⁾. 또한 프랑스에서도 차세대 고속전철인 TGV NG에 알루미늄 합금을 도입할 예정이다.

미국의 경우에도 철도차량의 알루미늄합금 이용률이 점점 증가하여 요즘에 주문되고 있는 화차의 경우 90%이상이 알루미늄 차량이라고 밝히고 있다⁽³⁾.

현재 국내에서 개발되고 있는 한국형 고속전철(KHST) 객차 연결장치에도 경량화를 위해서 알루미늄합금 주물재(AC4C), 알루미늄합금 압출재(AI 5083-O, AI 6005A-T6)를 사용하고있다. 따라서 본 연구에서는 외국의 피로강도 권장규격 및 문헌에 보고된 시험데이터를 조사하여, 알루미늄합금 압출재 모재 및 용접재, 알루미늄합금 주물재 와 알루미늄합금 볼트 연결부의 허용 피로강도를 구하였다. 또한 이들 결과를 이용하여 유한요소해석에 의한 한국형 고속전철 객차 연결장치의 피로강도를 평가하였다.

2. 알루미늄합금 재료의 허용피로강도

2.1 알루미늄합금 압출재 모재 및 용접재 이학주 등⁽⁴⁾은 AI 6005A-T6 압출재로 제작된 모

* 회원, 한국기계연구원 신교통기술연구부
 E-mail : jykang@kaist.ac.kr
 TEL : (02)958-3462 FAX :(02)968-1638

재 및 용접재 시험편과 고속전철 바닥재로 사용되는 구조물을 피로시험하여 얻은 피로강도가 European Convention for Constructional Steelwork(ECCS)⁽⁵⁾에서 권장하는 허용 피로강도 보다 크기 때문에 ECCS규격이 알루미늄 합금 구조물의 안전설계에 좋은 지침이 될 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 압출재 Al 5083-O, Al 6005A-T6 재료의 모재 및 용접재의 피로강도는 ECCS에서 제안한 값을 사용하기로 하였다.

ECCS⁽⁵⁾에서 제안한 알루미늄 합금 5000/6000 계열 단순 압출 평판재료 및 구조물의 모재 허용 피로강도범위 $\Delta\sigma$ 는 응력비 $R=+0.5$, 수명 2×10^6 cycle에서 각각 95MPa 과 70MPa이다. 이 값들은 $R=+0.5$ 에 대한 값으로 $R=-1$ 값으로 변환하기 위해서는 응력비에 따른 피로강도 수정계수가 필요하다.

ECCS에서는 응력비에 따른 피로강도 수정계수를 다음과 같이 제안하고 있다.

$$f(R) = \Delta\sigma(R) / \Delta\sigma(R=+0.5)$$

이 계수는 피로수명 $N=2 \times 10^6$ cycle에 대한 것이며 $R=+0.5$ 보다 작은 경우에 해당되며, 다음과 같이 구분되어 있다.

I. 잔류응력 영향이 무시될 수 있는 모재 및 가공제품

$$\begin{aligned} f(R) &= 1.6 & \text{for } R \leq -1 \\ f(R) &= -0.4R + 1.2 & \text{for } -1 < R \leq -0.5 \\ f(R) &= 1 & \text{for } R > -0.5 \end{aligned}$$

II. 잔류응력의 영향이 고려되어야 하는 단순구조 연결부위(용접재 등)

$$\begin{aligned} f(R) &= 1.3 & \text{for } R \leq -1 \\ f(R) &= 0.4R + 0.9 & \text{for } -1 < R \leq -0.25 \\ f(R) &= 1 & \text{for } R > -0.25 \end{aligned}$$

III. 잔류응력이 있는 복잡한 구조의 2차 또는 3차원 구조물

$$f(R) = 1$$

충분히 응력이 이완되어 있는 구조물의 연결부 위에는 I의 경우가 적용된다.

알루미늄 합금 5000/6000계열 단순 압출 평판재료 및 구조물은 I의 경우에 해당하므로 $R=-1$ 일 때의 피로강도 수정계수 $f(R)=1.6$ 이다. 따라서 $R=-1$ 인 경우 알루미늄 합금 5000/6000계열 단순 압출 평판재료 및 구조물의 모재 허용피로강도 범위 $\Delta\sigma$ 는 수명 2×10^6 cycle에서 각각 156MPa 과 112MPa이다.

또한 맞대기 용접한 알루미늄합금 압출 구조물의 경우 ECCS에서 제안한 $\Delta\sigma$ ($R=+0.5$, 수명 2×10^6 cycle)는 30MPa이다. 고속전철 객차 연결부

의 용접부위는 복잡한 구조의 3차원 구조물이므로 피로강도 수정계수는 III의 경우 ($f(R)=1$)에 해당하므로 $R=-1$ 에서의 $\Delta\sigma$ 는 30MPa이 된다.

2.2 알루미늄합금 주물재

ECCS⁽⁵⁾에서 제안한 알루미늄합금 허용피로강도 값들에는 알루미늄합금 주물재료가 포함되어 있지 않다. 따라서 알루미늄합금 주물재료 AC4C에 대한 피로강도데이터는 “Low Cycle Fatigue of A356-T6 Cast Aluminum Alloy-A Round-Robin Test Program”⁽⁶⁾에서 구하였다. KS AC4C와 유사 재료 기호는 JIS AC4C, NF AS7G06, ASTM 356-T6등이 있다. AC4C(A356-T6)에 대한 피로강도 시험데이터는 Fig. 1과 같다. ECCS⁽⁵⁾에서는 파손확률 2.3%의 피로강도를 사용하고 있으며, JIS E4207(철도차량용 대차프레임 설계통칙)에서는 파손확률 0.1%의 피로강도를 사용한다. 본 연구에서는 보다 안전한 피로강도평가를 위해서 파손확률 0.1%의 피로강도를 사용하기로 하였다. 알루미늄합금 주물 부품의 경우에는 시험편보다 치수가 크기 때문에 이를 고려해서 허용피로강도를 낮게 하여야 한다. 여기서는 ECCS⁽⁵⁾에서 주어진 압출 평판재료와 구조물의 피로강도비율 0.73(70/95)을 시험편과 실제 구조물의 사이의 치수효과 계수로 사용하였다. 참고로 JIS E4207에서는 시험편 피로한도의 80%를 대차프레임의 피로한도로 사용하고 있다. AC4C 구조물의 허용피로강도진폭(피로수명 2×10^6 cycle)은 다음과 같이 구하였다.

$$60.2\text{MPa} (0.1\% \text{파손확률에 대한 시험편의 허용 피로강도진폭}) \times 0.73 (\text{치수효과}) = 44.4\text{MPa}$$

2.3 알루미늄합금 볼트 연결부

Lazzarin등⁽⁷⁾은 알루미늄합금(6061-T6, 7020-T6, 2024-T4) 볼트 연결부에 대하여 170개의 피로시험을 해서, 수명 2×10^6 cycle에서 50% 파손확률의 응력진폭과 S-N곡선($N \times \sigma_a^k = C$)의 기울기 k 는 $R=0$

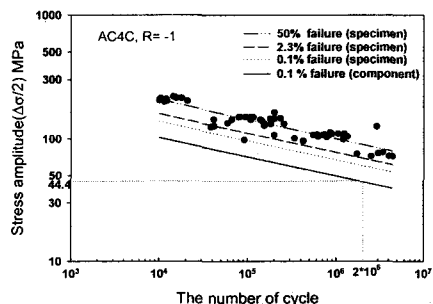


Fig. 1 S-N curve of AC4C.

인 경우 $\sigma_a = 41.2\text{MPa}$, $k=3.76$, $R=-1$ 인 경우 $\sigma_a = 52.6\text{MPa}$, $k=3.10$ 이며, 피로설계에 사용되는 2.3% 파손확률의 경우에는, 기울기는 그대로 유지되고 응력진폭은 각각 $\sigma_a = 31.4\text{MPa}(R=0)$ 과 $\sigma_a = 38.4\text{MPa}(R=-1)$ 이라고 보고하였다.

1995년 Eurocode 9에서 제안한 알루미늄합금 볼트 연결부위 피로강도는 응력비에 관계없이 $\sigma_a = 31\text{MPa}(2 \times 10^6 \text{ cycle})$, $k=4$ 이며, 1996년 Eurocode 9의 개정판에서는 $R \geq 0$ 인 경우 $\sigma_a = 27.5\text{MPa}(2 \times 10^6 \text{ cycle})$, $k=4$, $R < 0$ 인 경우는 압축응력부분의 30%를 $\sigma_a = 27.5\text{MPa}$ 에 더한 값을 피로강도 허용응력으로 사용할 것을 제안하였다. 이 값들은 Lazzarin 등⁽⁷⁾의 연구결과와 비교하면 보다 안전측의 허용피로강도인 것을 알 수 있다.

BS8118⁽⁸⁾에서는 응력비에 관계없이 $2 \times 10^6 \text{ cycle}$ 에서 $\sigma_a = 19.5\text{MPa}$, $k=3$ 을 알루미늄합금 볼트 연결부의 피로강도로 제안하고 있으며, 미국규격⁽⁹⁾에서는 $0 < R < 0.5$ 인 경우 $\sigma_a = 11\text{MPa}$, $k=3.66$, $R < 0$ 인 경우 $\sigma_a = 18\text{MPa}$ 를 제안하고 있다. 이 규격은 알루미늄합금 볼트연결부의 피로강도를 Lazzarin 등⁽⁷⁾의 실험결과에 비해서 지나치게 안전측으로 제안하고 있다.

Atzori 등⁽¹⁰⁾은 알루미늄합금(6061-T6, 6061-T651, 7020-T6, 2024-T4, AlZnMg1-F36, AlMg4.5Mn-F28) 볼트 연결부의 피로시험 데이터 750개를 수집하고 이 데이터들을 통계적으로 해석하여, 피로강도 설계에 사용되는 2.3% 파손확률에서의 응력진폭(수명 $2 \times 10^6 \text{ cycle}$) 및 기울기를 다음과 같이 제안하였다.

$R=0$ 인 경우 $\sigma_a = 29.2\text{MPa}$, $k=3.85$

$R=-1$ 또는 -0.5 인 경우 $\sigma_a = 40.5\text{MPa}$, $k=3.35$

본 연구에서는 Atzori 등⁽¹⁰⁾의 연구결과를 사용하기로 하였다.

3. 수정 Goodman식에 의한 허용응력

수정 Goodman식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_a(R=-1)} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (1)$$

여기서 σ_a 는 평균응력을 고려한 피로응력진폭 $\sigma_a(R=-1)$ 은 평균응력이 0인 경우 피로응력진폭
 σ_m 는 평균응력
 σ_u 는 인장강도이다.

식(1)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_a = \sigma_a(R=-1) \times \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right) \quad (2)$$

피로응력진폭이 평균응력의 20%인 경우 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_a = 0.2 \times \sigma_m \quad (3)$$

식(2)와 식(3)으로부터 다음과 같이 식(4)가 유도된다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a(R=-1)}{0.2 + \frac{\sigma_a(R=-1)}{\sigma_u}} \quad (4)$$

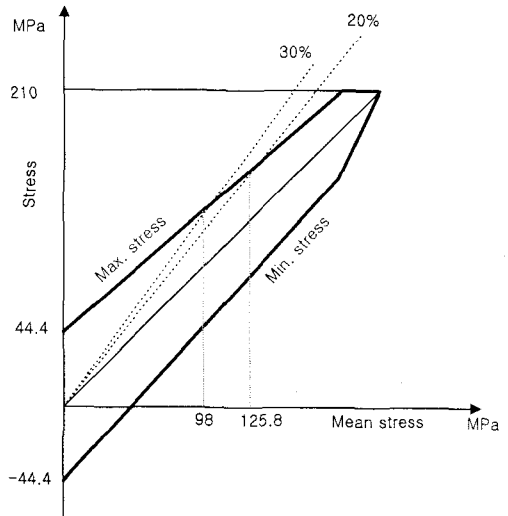


Fig. 2 The modified Goodman diagram of AC4C component.

Table 1 Criteria for fatigue strength evaluation

Material name	Allowable stress amplitude σ_a ($R=-1$, $2 \times 10^6 \text{ cycle}$) MPa	Allowable mean stress when applying Goodman diagram ($\sigma_a = 0.2 \times \sigma_m$) MPa
AC4C component	44.4	125.8
Base metal 5000/6000 components	56	148(A5083) 135(A6005)
Butt welded 5000/6000 components	15	60.5(A5083) 58.2(A6005)
Bolted joint	40.5	123.2(A5083) 113.8(A6005) 111.9(AC4C)

정하중응력, 즉 평균응력의 20%를 피로응력진폭으로 하는 경우 식(4)에서와 같이 피로강도를 고려한 허용 정하중응력은 평균응력이 0인 경우의 허용 피로강도진폭 $\sigma_a(R=-1)$ 에 의해서 결정된다.

알루미늄합금의 경우 인장평균응력을 받는 경우에는 수정 Goodman식이 잘 맞으나, 압축평균응력을 받는 경우에는 평균응력의 영향이 수정 Goodman식에 의한 평균응력의 영향보다 적거나 거의 나타나지 않는 것으로 알려져 있다⁽¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 압축평균응력의 영향은 고려하지 않았다.

알루미늄합금 주물재 AC4C의 경우 수정 Goodman선도에 의한 허용응력은 Fig. 2 같다.

고속전철 객차 연결부에 사용되는 알루미늄합금 재료들의 피로강도를 고려한 허용응력은 식(4)에 의해서 계산하였으며, Table 1에 그 결과를 표시하였다.

4. 유한요소해석에 의한 피로강도평가

4.1 Carrying ring의 피로강도 평가

4.1.1 Carrying ring의 유한요소모델

Carrying ring을 포함하여 차체의 전방구조까지 모델링 한 것이 Fig. 3이다. 유한요소모델은 솔리드 요소 35,432개, 셸 요소 19,087개이고 절점수는 66,296개로 구성하였으며, 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭임을 고려한 반쪽모델이다.

4.1.2 Carrying ring의 하중조건

Carrying ring의 피로강도해석은 정상하중(CN)과 브레이크하중(+/-C)에 의한 정하중의 조합(CN+C, CN-C)을 고려해서 수행된다. 또한 여기서 고려되는 동적하중은 정하중의 +/-20%이다.

a) 브레이크하중(31400 N)(+/-C)

브레이크하중의 작용점은 pivot housing에 위치하며 그 힘은 31400 N이다

b) 정상하중(150250 N)(CN)

볼과 소켓 연결부 패드를 통하여 연결베어링에 작용하는 하중은 $F_y=150250$ N이며, air bag support에 작용되는 반력은 $F_y=(150250+128160)/2$ N이다.

4.1.3 Carrying ring의 피로해석

피로해석은 다음과 같이 3가지 경우에 대하여 수행하였다.

a) 동적하중(0.2CN)만이 작용하는 경우

정적하중에 의한 주응력이 압축응력인 경우로서 평균응력의 영향을 고려하지 않고 피로강도평

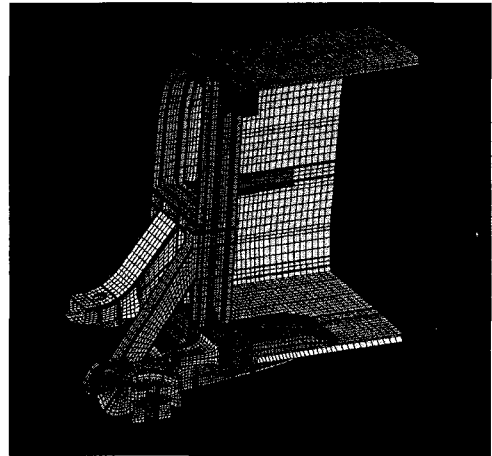


Fig. 3 FE Model of carrying ring



Fig. 4 Maximum or minimum principal stress of the carrying ring loaded by 0.2CN, CN+C or CN-C force.

가를 하였다.

해석결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 air bag support 연결부에서 최소압축 주응력 -10.4MPa이 발생하였다. Table 1에 주어진 이 부위에서의 허용응력진폭은 15MPa이다. 동적하중(0.2CN)만이 작용하는 경우 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

b) 평균하중 CN+C가 작용하는 경우

Carrying ring에 작용되는 정적하중에 의한 평균응력이 인장인 경우에는 수정 Goodman식을 이용하여 평균응력의 영향을 고려하여 피로강도를 평가해야 한다.

해석결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 air bag support 연결부에서 최대인장 주응력 40.3MPa이 발생하였다. 피로응력진폭이 정하중응력(평균응력)의 +/-20%인 경우 Table 1에 주어진 이 부위에서의 허용 정하중응력은 60.5MPa이므로 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

c) 평균하중 CN-C가 작용하는 경우

해석결과는 평균응력 CN+C가 작용하는 경우와 동일하게 air bag support 연결부에서 최대인장 주응력 38.4MPa이 발생하였다. 이 부위에서의 허용 정하중응력은 60.5MPa이므로 평균하중 CN-C을 받는 경우 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

4.2 Fixed ring의 피로강도 평가

4.2.1 Fixed ring의 유한요소모델

Fixed ring를 포함하여 차체의 후방구조까지 유한요소 모델로 만든 것이 Fig. 5이다. 대칭조건을 이용하여 1/2로 모델링하였으며, 솔리드 요소 25,138개, 셸 요소 19,001개, 그리고 절점수 50,583개로 구성하였다.

4.2.2 Fixed ring의 하중조건

Fixed ring의 피로강도해석은 정상하중(CN)과 24%경사에 가해지는 운행하중(+H traction, -H compression)의 조합의 정하중을 고려해서 수행된다. 여기서는 이러한 하중들을 CN+H, CN-H로 규정한다. 또한 여기서 고려되는 동적하중은 정상하중(CN)의 +/-20%이다.

a) 운행하중(4.66845 ton)(+/-H)

볼과 소켓 연결부에 작용되는 운행하중이 연결 베어링에 전달된다고 생각한다. 이 힘은 연결 베어링에 120° 각도로 고르게 분포되어 있다고 가정한다.

b) 정상수직하중(15ton)(CN)

15톤의 하중이 지지부 표면에 작용한다.

4.2.3 Fixed ring의 피로해석

피로해석은 다음과 같이 3가지 경우에 대하여 수행하였다.

a) 동적하중(0.2CN)만이 작용하는 경우

정적하중에 의한 주응력이 압축응력인 경우로서 평균응력의 영향을 고려하지 않고 피로강도평가를 하였다.

해석결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 end casting 부위에서 최소압축 주응력 -13.6MPa이 발생하였다. Table 1에 주어진 이 부위에서의 허용응력진폭은 44.4MPa이다. 동적하중(0.2CN)만이 작용하는 경우 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

b) 평균하중 CN+H가 작용하는 경우

Fixed ring에 작용되는 정적하중에 의한 평균응력이 인장인 경우에는 수정 Goodman식을 이용해서 평균응력의 영향을 고려해서 피로강도를 평가해야 한다.

해석결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 fixed ring

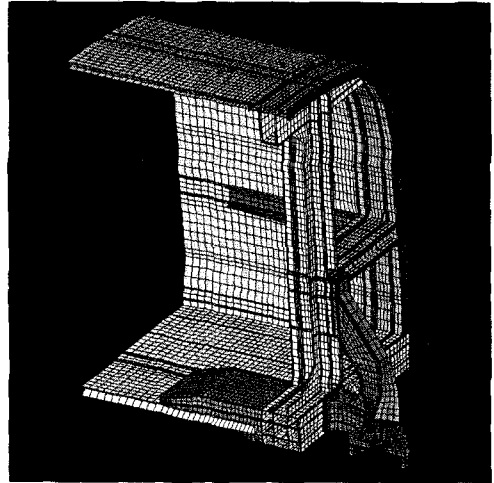


Fig. 5 FE Model of fixed ring.

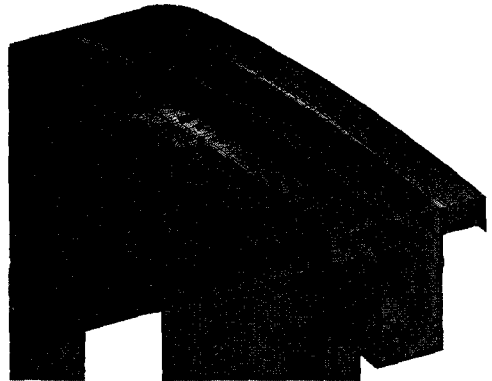


Fig. 6 Minimum principal stress of the fixed ring loaded by 0.2CN force.

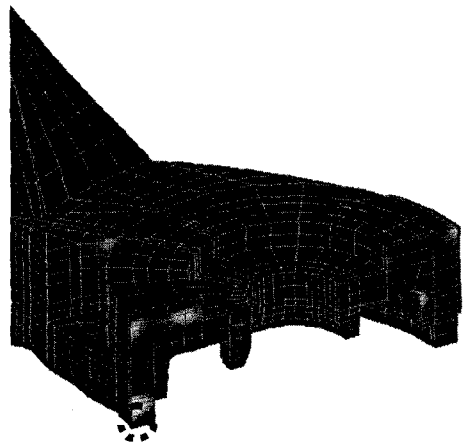


Fig. 7 Maximum principal stress of the fixed ring loaded by CN+H or CN-H force.

주물부 끝단에서 최대인장 주응력 58.2MPa이 발생하였다. 피로응력진폭이 정하중응력의 +/-20%인 경우 Table 1에 주어진 이 부위에서의 허용 정하중 응력은 125.8MPa이다. 평균하중 CN+H를 받는 경우 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

c) 평균응력 CN-H가 작용하는 경우

해석결과는 평균응력 CN+H가 작용하는 경우와 동일하게 fixed ring 주물부 끝단에서 최대인장 주응력 58.1MPa이 발생하였다. 이 부위에서의 허용 정하중응력은 125.8MPa이므로 평균하중CN-H을 받는 경우 허용피로강도를 초과하는 부위는 발생하지 않았다.

5. 결론

(1) 유한요소해석에 의한 한국형 고속전철 객차 연결장치의 피로강도 평가에서는 carrying ring 및 fixed ring모두 허용피로강도를 초과하지 않았다. 그러나 본 연구에서 규정한 허용피로강도는 연결장치에 사용된 알루미늄합금 모재, 용접재 및 주물재에서 비파괴검사를 포함한 규정된 품질조절 요구에 의해 검출되는 결함이 없어야 하며, 규정된 기본 물성치 조건(인장강도, 항복응력 등)을 만족하는 경우에 한정된 것이다.

(2) 이전연구⁽⁴⁾에서 국내에서 제작된 알루미늄합금(6005A-T6) 압출재 및 용접재를 피로시험을 하여, 이 재료는 ECCS에서 제안한 피로강도보다 매우 우수한 피로강도를 가지고 있음을 확인 하였다. 그러나 알루미늄합금 주물재(AC4C) 와 볼트 연결부위는 피로시험을 하지 않고, 문헌에 보고되어 있는 피로강도 데이터로부터 허용피로강도를 추정하여 사용하였으므로 보다 정확한 피로강도평가를 위해서는 한국형 고속전철에 사용된 알루미늄합금 주물재(AC4C) 와 볼트 연결부위의 피로시험이 요구된다.

후 기

본 연구는 2000년도 건설교통부/통상산업부/과학기술부 선도기술사업인 “G7고속전철기술개발사업”의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

(1) Froes, F.H., 1994, “Aluminum : Key to Advancing the Performance of the Bullet Train,” Light Metal Age.
 (2) Railway Gazette International, 1991, Aluminum

Invades Europe's Main Line Coach Market .
 (3) Pennington, J. N., 1994, “Aluminum : Big Gains Coming from Rail Cars, Bridges,” Modern Metals.
 (4) Lee, H.J. Han, S.W. and Lee, S.R., 2000, “Fatigue Strength of Butt Welded Aluminum Alloy Component for Railway Vehicles,” SEM IX International Congress on Experimental Mechanics, Orlando, Florida, Jun 5-8.
 (5) Kosteus D., and Valtinal, G., 1992, European Recommendations for Aluminum Alloy Structures Fatigue Design, ECCS Technical Committee 2.
 (6) Stephens, R.I., 1988, Fatigue and Fracture Toughness of A356-T6 Cast Aluminum Alloy, SAE Sp-760.
 (7) Lazzarin, P., Milani, V. and Quaresimin, M., 1997, “Scatter Bands Summerizing the Fatigue Strength of Aluminum Alloy Bolted Joints,” Int. J. Fatigue, Vol. 19, No. 5, pp.401-407.
 (8) BS 8118-91, 1991, Structural Use of Aluminium(Part 1: Code of Practice for Design, Part 2: Specification for Materials, Workmanship and Protection), BSI, London, UK.
 (9) Aluminum Association, 1994, Aluminum Design Manual, Aluminum Association Washington, DC, USA.
 (10) Atzori, B., Lazzarin, P. and Quaresimin, M., 1997, “A Re-Analysis on Fatigue Data of Aluminum Alloy Bolted Joints,” Int. J. Fatigue, Vol. 19, No. 7, pp. 579-588.
 (11) Frost, N.E., Marsh, K.J. and Pook, L.P., 1999, Metal Fatigue, Dover Publication, Inc, Mineola, New York, pp. 72-73.