

경량 재료의 T형 접합이음의 피로강도 평가

Fatigue Strength Evaluation of T-Peel Adhesive Joint for Light Weight Material

이 강 용*, 공 병 석**, 최 홍 섭***
K. Y. Lee, B. S. Kong, H. S. Choi

ABSTRACT

The evaluation of joint fatigue strength of light weight materials for an electrical vehicle body has been performed through T-peel joint tests with the design parameters such as joint style, adherend type, adherend thickness, adhesive thickness, and various adhesives. Fatigue strength was evaluated through 5-Hz, tension-tension, load controlled test with the zero stress ratio. It was observed that the fatigue strength of the joint increases with the increase of the adherend thickness. With the increase of the adhesive thickness, however, the fatigue strength of the joint increases insignificantly. An aluminum-FRP adherend combination shows much higher fatigue strength than an aluminum-aluminum adherend combination. The results of fatigue tests were found to be consistent with those of static tests.

주요기술용어 : T-Peel Joint(T형 이음), Fatigue Strength(피로강도), Static Strength(정하중 강도), Light Weight Material(경량 재료)

1. 서 론

최근 차량의 경량화과제가 급속도로 부상함에 따라 접착제의 광범위한 적용이 검토되어 왔다. 이러한 현상의 두 가지 이유는 첫째, 접착제는 종래의 저항 점용접을 대신하여 경량재료인 알루미늄이나

복합재를 접합할 수 있는 유일한 방법으로 기대를 받고 있으며 둘째, 접착제의 적용 자체가 기존의 점용접에 비해 강도나 수명에 있어서 오히려 향상되는 결과를 보여주기 때문이다. 접착강도의 측정 방법에는 전단 시험법과 박리 시험법이 주로 이용된다. 이러한 시험방법은 피접착재의 재질, 두께 등에 따른 변형의 정도에 따라 접착제 내부의 응력 분포가 다르기 때문에 접착강도도 달라지게 되며 이러한 의미에서 이러한 시험은 접착력을 측정하기보다는 접착 시험편 자체의 강도를 측정하는

* 정회원, 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 대학원 기계공학과

*** 한국항공기술연구원

것이라 하겠다. 피접착재의 인장-전단 변형을 받는 접착이음에 대한 접착제의 기계적 특성을 해석하는데는 주로 전단 시험이 이용되며 이강용 등^{1,2)}은 접착만으로 이루어진 단순 겹치기 이음 시편과 그것에 리벳으로 보강된 시편을 대상으로 접착 이음의 강도에 대한 필렛, 피접착재의 종류, 접착 길이, 접착 두께, 환경 변수 등의 다양한 설계변수에 대해 정하중과 피로하중에 대하여 실험한 연구 결과를 제시하였다. Krenk 등³⁾은 단순 겹치기 이음 시편에 대해 비선형 유한요소해석과 균열 성장 실험을 통해 피로해석을 수행했다. 단순 겹치기 이음 시편은 인장-전단변형을 받는데 반해 T형 접착이음은 인장-굽힘 변형을 받는다. 이러한 접착이음에 대한 기계적인 특성을 해석하는데는 peel test가 주로 이용된다. 이러한 시험에 대해 Bigwood와 Crocombe⁴⁾는 FEM을 이용하여 탄성해석을 행하였고, Chen과 Falvin⁵⁾은 굽힘을 받는 피접착재의 소성변형을 고려하여 peel stress의 근사해를 구하였으며, Gent와 Hamed⁶⁾는 기초적인 보 이론을 적용하여 피접착재의 소성변형에 의해 소산되는 에너지를 구하였다. 그런데 peel test는 주로 얇은 피접착재에 대한 시험방법이며, 실제로 자동차 차체에 적용하기 위해서는 두꺼운 피접착재에 대한 해석이 요구된다. Pearson⁷⁾은 T형으로 된 다양한 접착이음의 형태와 하중속도에 대해 접착강도를 실험적으로 비교하였다. Nardini와 Seeds⁸⁾는 알루미늄으로 된 T형 접착이음인 경우가 강재를 점용접에 의해 접합한 경우보다 정하중강도나 피로하중강도가 향상됨을 보여주었고, FEM 해석을 통해서 각 설계변수가 접착층 내부의 응력분포에 미치는 영향을 고려하였다. Gilchrist와 Smith^{9,10)}는 접착면 내의 응력분포를 구하여 최대수직응력이 정하중강도에 미치는 영향을 밝히고, 필렛이 정하중강도와 피로하중강도에 미치는 영향을 나타내었다. 또한 접착층 내부의 응력분포를 FEM에 의해 구한 후 최대응력과 피로에 의한 균열 생성의 위치를 예상하였고, 균열의 성장 방향, 수명 등에 대해서도 연구하였다. 최근 이강용 등¹¹⁾은 접착만으로 이루어진 T형 접합 이음 시편과 그것에 리벳으로 보강된 시편을 대상으로 접착 이음 강도에 대한 접합의 종류, 피접착재의 종류, 피접착재 두께, 접착 두께, 접착제의 종류 등의 다양한 설계변수에

대해 정하중에 대하여 실험한 연구 결과를 제시한 바 있다. 본 연구에서는 후속 연구로써 접합부의 피로강도 향상을 만족시킬 수 있는 접합부의 설계 근거를 마련하기 위해 접합시험편을 대상으로 피로하중 실험을 수행하고 정하중 실험결과와 비교하고자 한다.

2. 실 험

2.1 설계 변수

해석과 실험에서 대상이 되는 설계 변수는 접합의 종류, 피접착재의 종류, 피접착재 두께, 접착 두께, 접착제의 종류로 설정하였다. 접합의 종류는 2가지(접착에 의한 접합, 리벳으로 보강된 접착에 의한 접합)로 하였고, 피접착재의 종류도 2가지(알루미늄-알루미늄, 알루미늄-복합재)로 하였으며 피접착재 두께, 접착 두께는 각각 3가지로 변화시켜서 피로하중 강도에 미치는 영향을 살펴보았다.

2.2 접착에 의한 접합

2.2.1 실 험

1) 시 편

피접착재로 사용된 알루미늄은 Al 5052-H32이고, 복합재는 epoxy resin에 glass를 fiber로 사용한 FRP(Fiber Reinforced Plastic) DMS 2288(type 3, class 4, grade E)을 사용하였다. 접착제는 이액형, 상온경화 에폭시계열의 DP460, Araldite 2012, Araldite 2015를 각각 사용하였다. 이들 재료는 저자의 기존연구¹¹⁾와 동일하며 재료의 특성은 참고문헌¹¹⁾에서 상세히 기술하였으므로 여기서는 생략한다. 대체적인 시편형상은 SAE J1863¹²⁾에 근거하였으나 피접착재의 종류(Al-Al, Al-FRP)에 따른 강도에 미치는 영향을 비교하기 위하여 시편형상은 Fig.1에서 보는 바와 같이 중간에 사각형 모양의 피접착재를 삽입한 변형된 형태를 취하였다. 시편 제작 과정은 참고문헌¹¹⁾에서 상세히 서술되었으므로 여기서는 생략한다.

2) 실 험

피로강도를 결정하기 위해 일정 응력 진폭 제어 방식으로 피로하중을 주었으며, 이러한 제어방식에 대한 피로시험 방법은 ASTM Standard¹³⁻¹⁷⁾

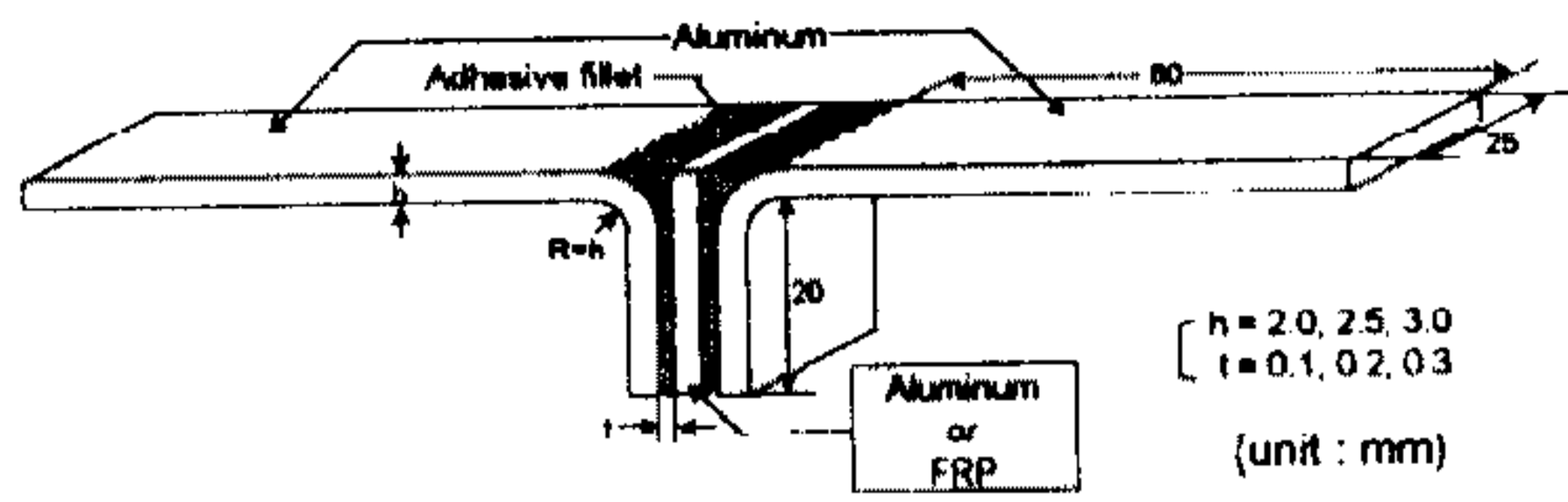


Fig.1 Configuration of T-peel joint with fillet

에서 제시하고 있다. 시험기는 정하중 시험시 사용하였던 INSTRON Co.의 EUTM-10ton(model No.1350)이 사용되었고, 탄성거동이 지배적인지 확인하기 위해 x-y plotter에 시험 시작후 몇 cycle 정도 hysteresis loop를 그렸다. 응력비 $R(=\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 은 0으로 하였다. 피로 강도를 비교하기 위해 같은 피로하중 상태에서의 피로수명의 차이를 살펴보았다. 하중 진폭과 평균 하중은 접착제에 따라 접착 강도의 차이가 심하기 때문에 각 접착제에 대해서 $10^3 \sim 10^6$ 사이클 범위에서 피로 수명을 가지도록 다르게 설정하였는데, 최대 하중을 DP 460은 45kgf, Araldite 2012는 20kgf, Araldite 2015는 30kgf로 하였다. 각 접착제에 대해서 시간에 대한 응력 변화는 sine함수 꼴로 하였고, 또한 시험 주파수는 5Hz로 하였다. 시편의 완전한 파단을 최종 피로파손의 기준으로 설정하였다. 실험은 상온에서 수행하였다.

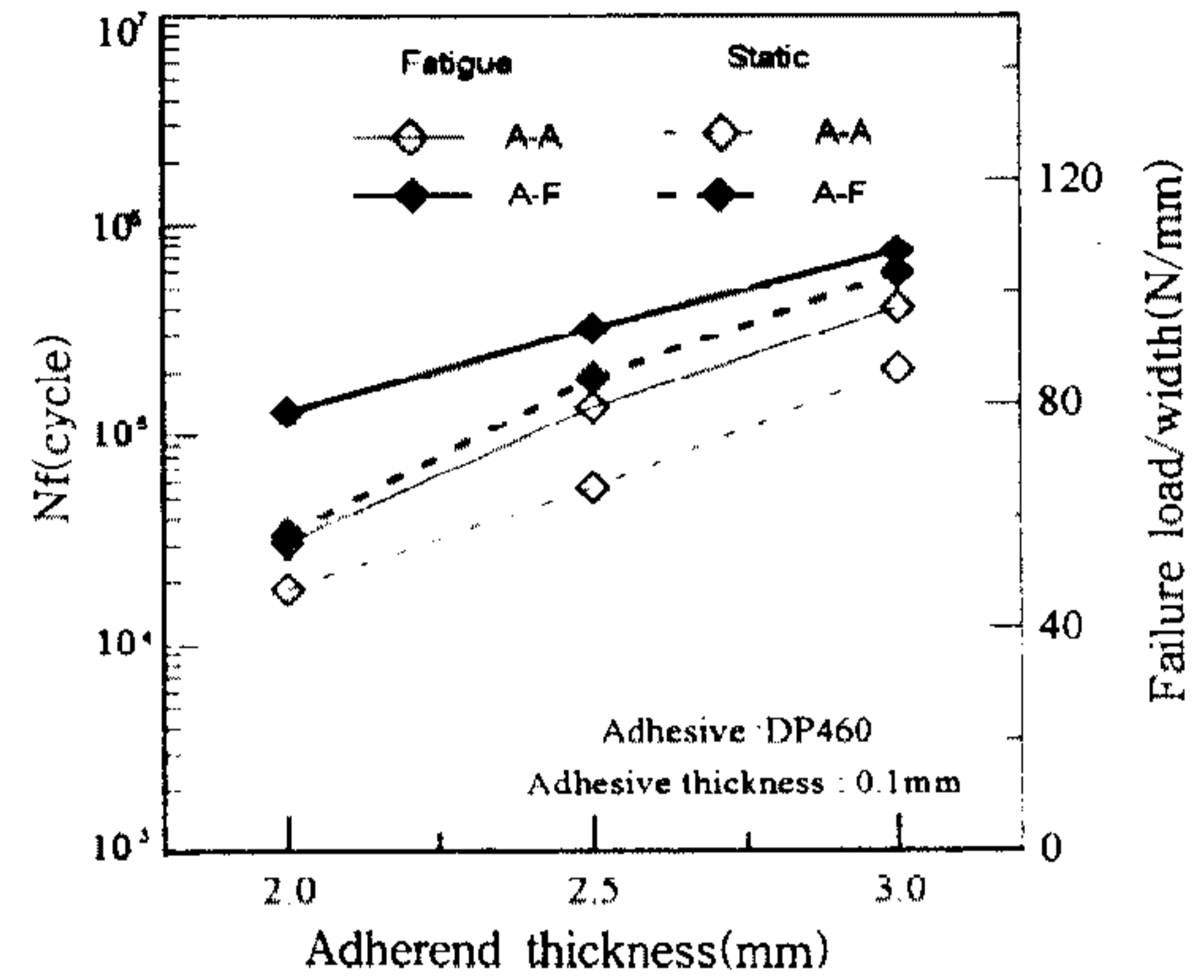
2.2.2 실험 결과

1) 피접착재 두께

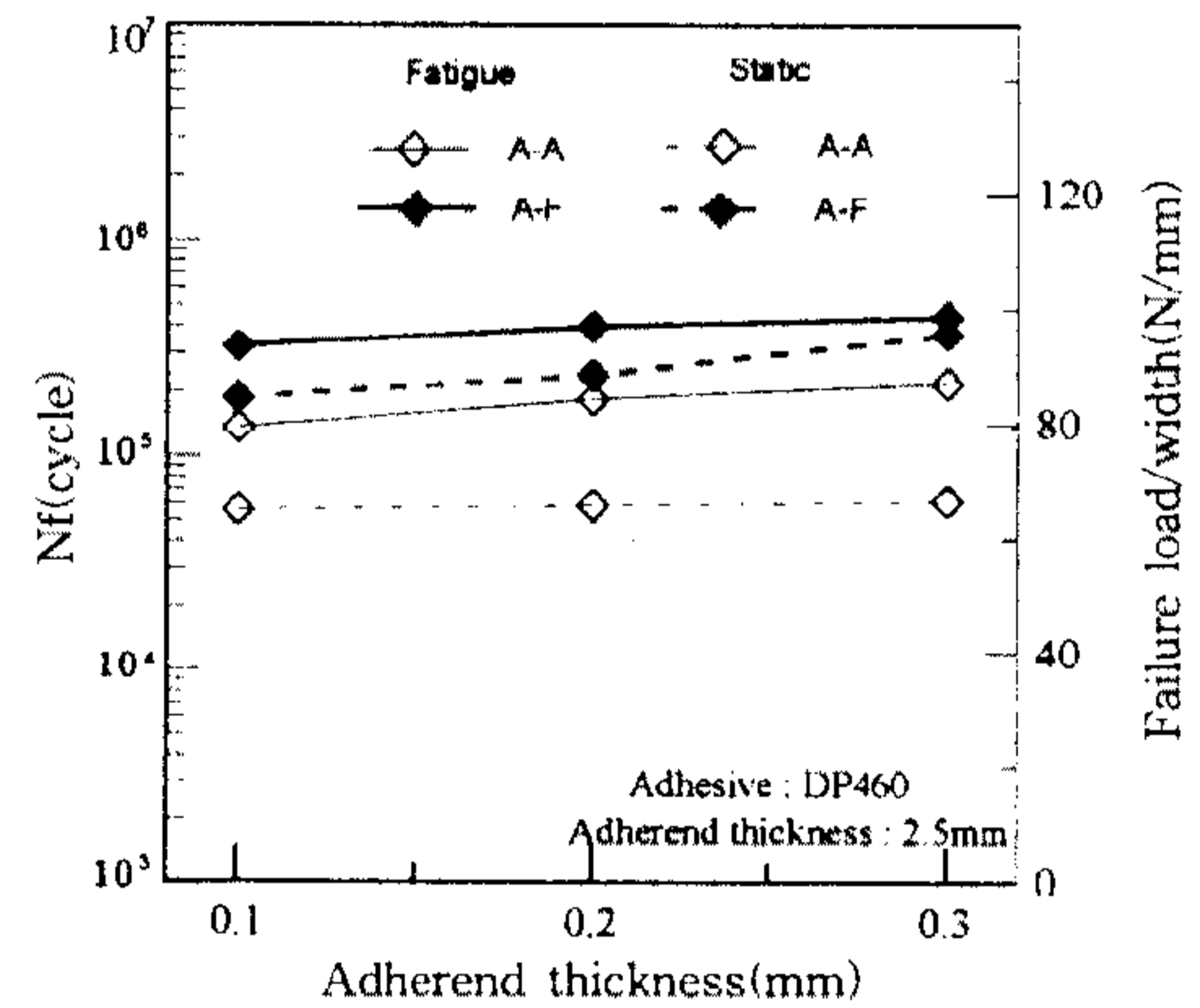
각 시편($t=0.1\text{mm}$)의 피로 강도에 대한 피접착재 두께의 영향을 평가하기 위하여 완전히 파손될 때까지의 사이클, 즉 피로수명(Nf)을 실험으로 구하였다. 정하중 경우와의 비교를 위해 접착강도도 나타내고 있다. 실험 결과를 Fig.2(a)~Fig.4(a)에 나타내었다. 피접착재 두께가 증가함에 따라 피로수명이 증가하여 피로 강도가 우수해지는 경향을 보인다. 정하중 실험과 비교할 때 접착강도가 증가하는 경향과 잘 일치함을 알 수 있다.

2) 접착 두께

각 시편($h=2.5\text{mm}$)의 피로 강도에 대한 접착재 두께의 영향을 평가하기 위하여 피로수명(Nf)을 실험으로 구하였다. 역시 정하중 경우와의 비교를 위해 접착강도도 나타내고 있다. 실험의 결과를 Fig.2(b)~Fig.4(b)에 나타내었다. 접착재 두께가 증가함에 따라 피로수명은 일정하거나 약간



(a)



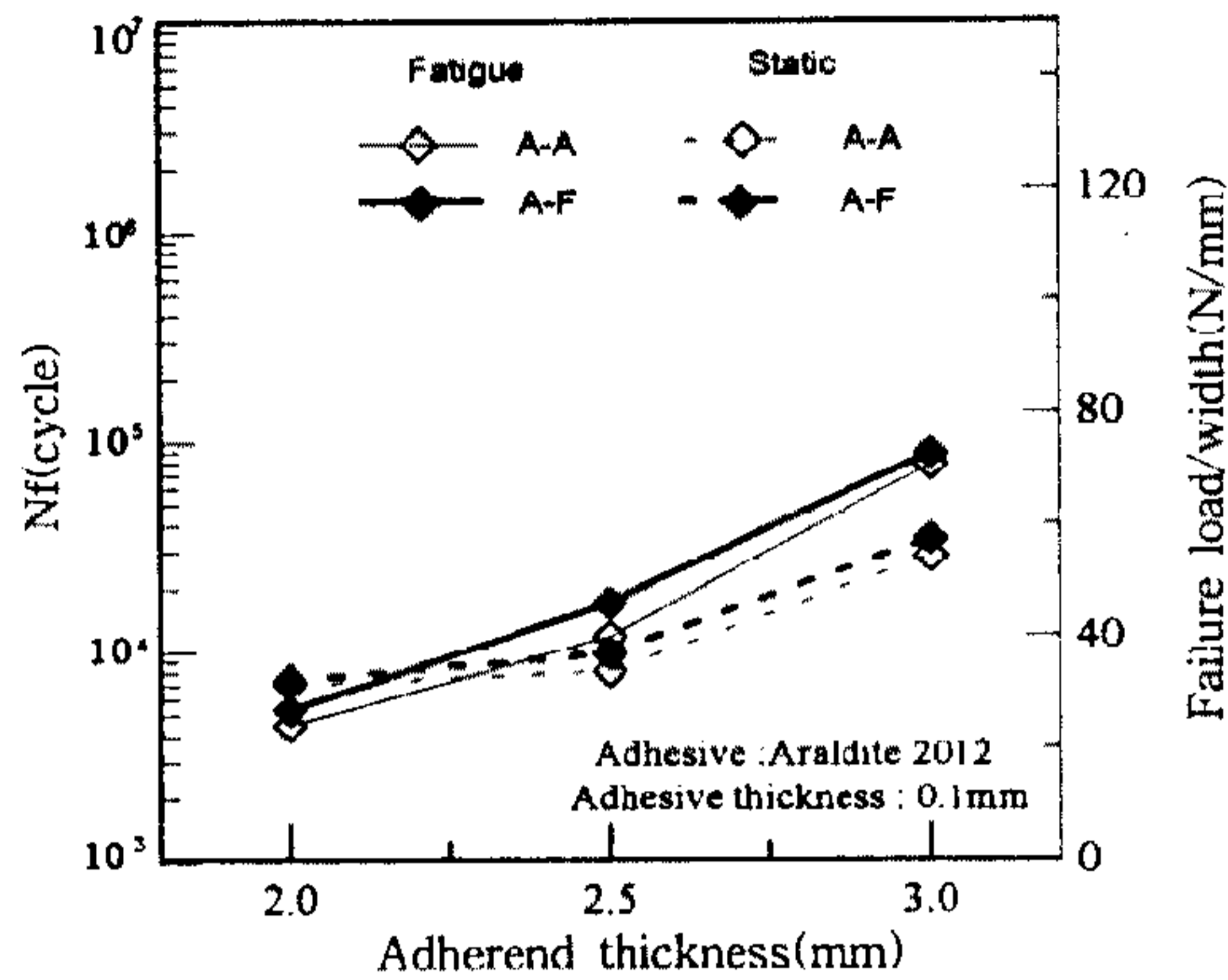
(b)

Fig.2 Effect of adherend and adhesive thicknesses on fatigue strength for various adherend types(Adhesive : DP460, $\Delta P=45\text{kgf}$)

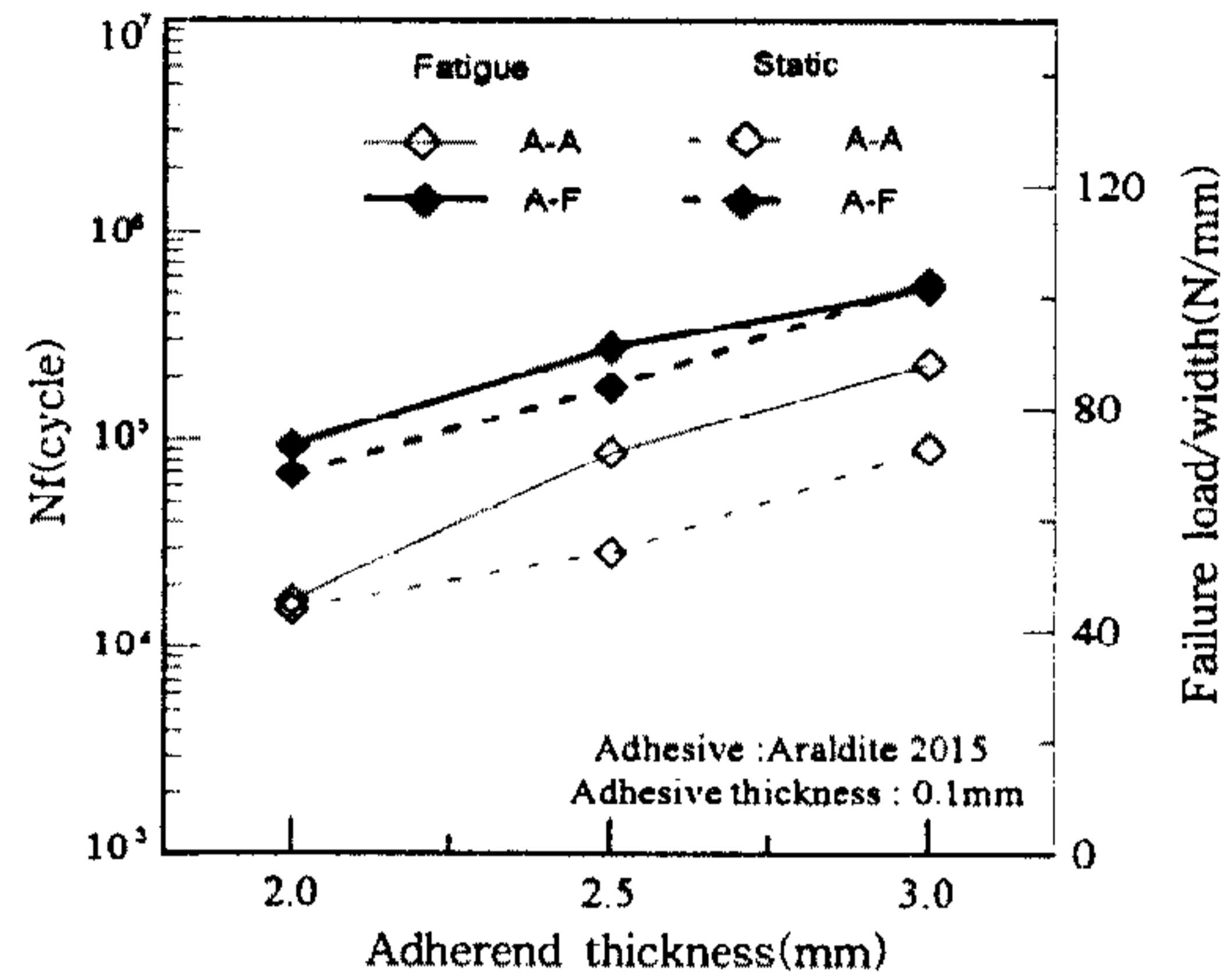
증가하는 경향을 보인다. 정하중 실험과 비교할 때 접착강도의 변화 경향과 잘 일치함을 알 수 있다.

3) 피접착재의 종류

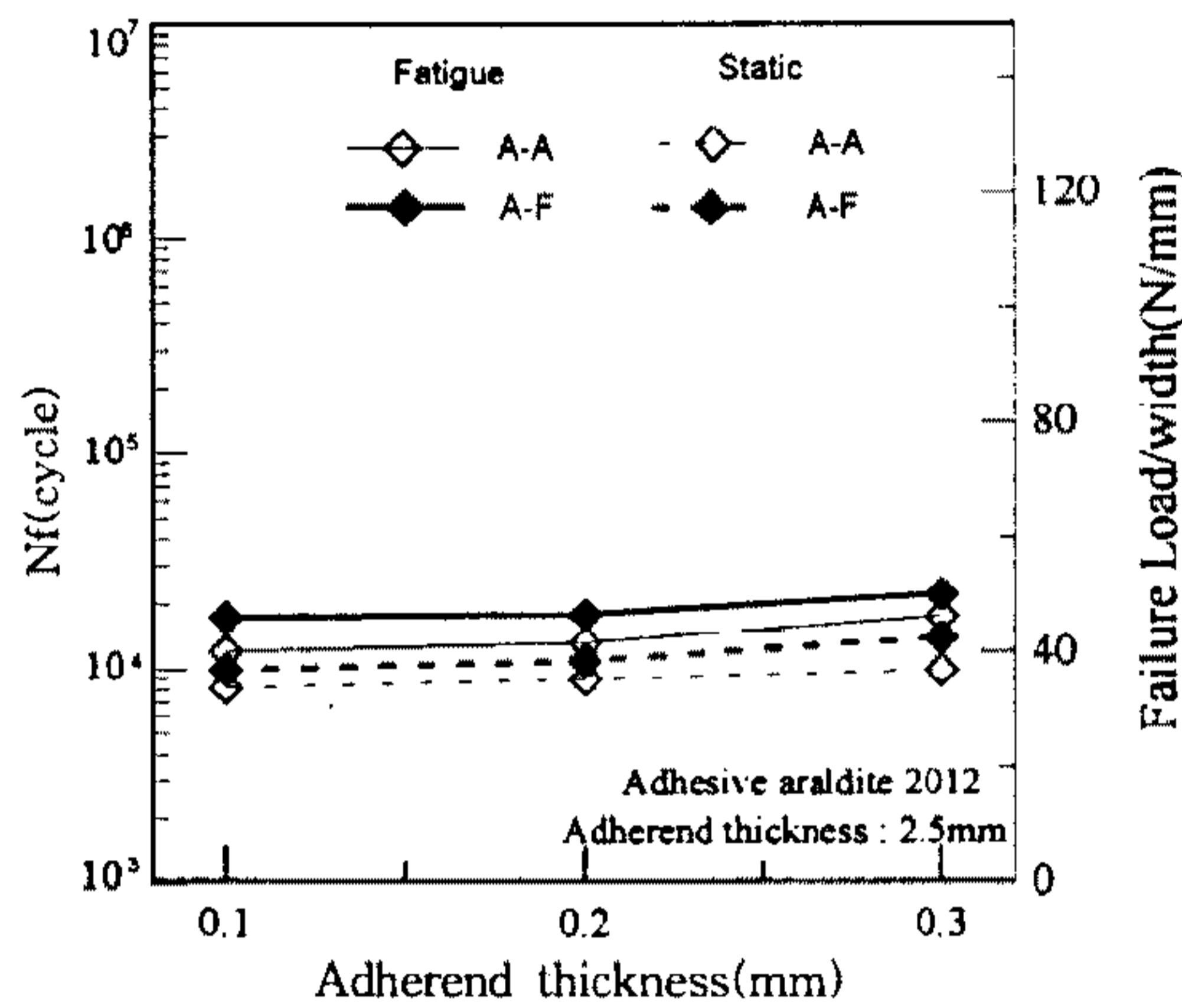
피로강도에 대한 피접착재의 종류의 영향을 평가하기 위하여, 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편에 대하여 피접착재 두께가 다른 시편($t=0.1\text{mm}$)과 접착 두께가 다른 시편($h=2.5\text{mm}$)을 대상으로 실험을 하여 피로수명을 구하였다(Fig. 2~Fig.4). 전반적으로 알루미늄-복합재 시편이 알루미늄-알루미늄 시편보다 피로수명이 길어서 피로 강도가 더 뛰어난을 알 수 있었지만 접착제 Araldite 2012의 경우에는 별로 강도의 향상이 없었다. 역시 정하중 시험시 접착강도에 미치는 피접착재



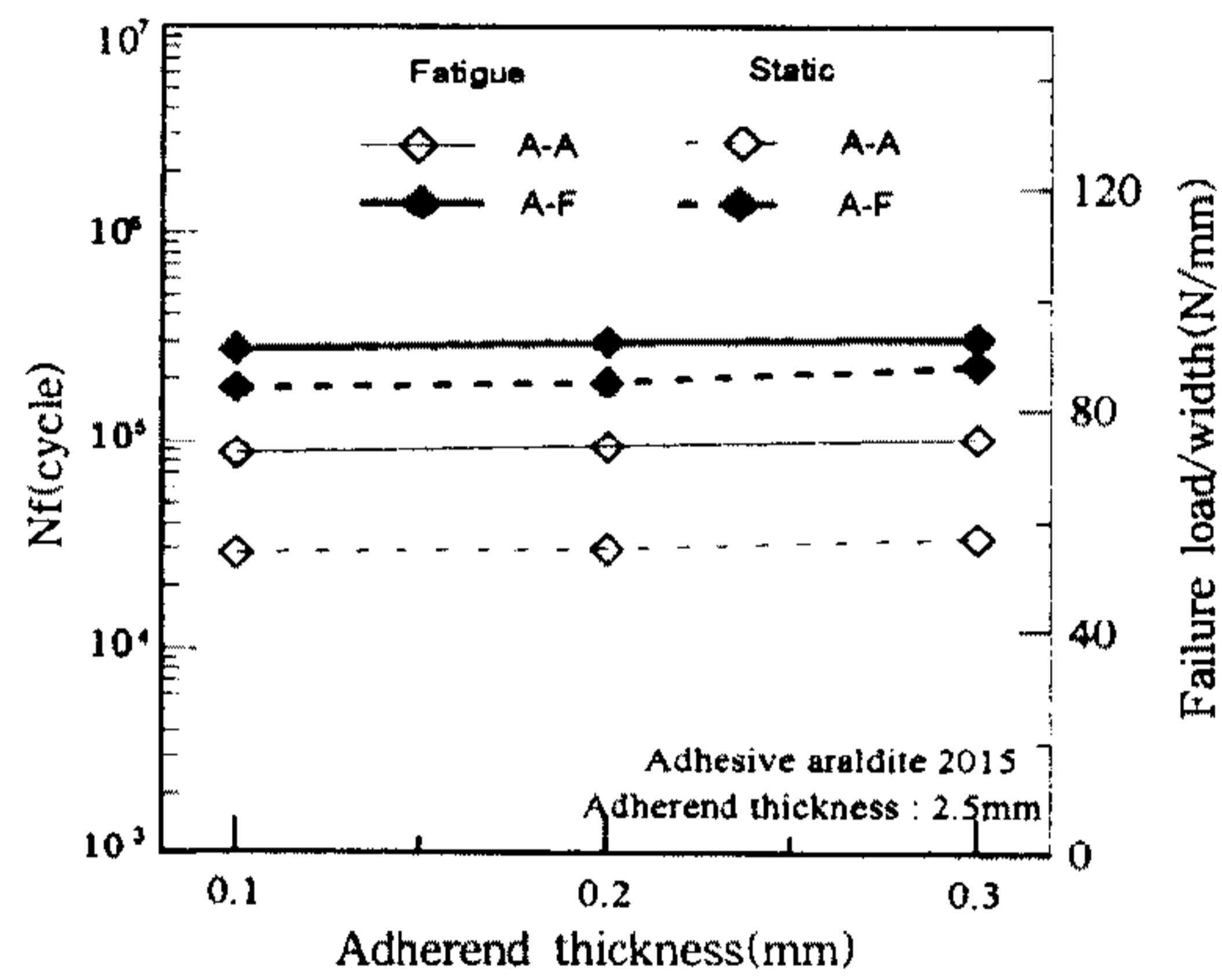
(a)



(a)



(h)



(b)

Fig.3 Effect of adherend and adhesive thicknesses on fatigue strength for various adherend types(Adhesive : Araldite 2012, $\Delta P=20\text{kgf}$)

Fig.4 Effect of adherend and adhesive thicknesses on fatigue strength for various adherend types(Adhesive : Araldite 2015, $\Delta P=30\text{kgf}$)

의 종류에 대한 영향과 일치함을 알 수 있다.

4) 접착제 종류

접착 강도에 대한 접착제 종류의 영향을 평가하기 위하여, 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편에 대하여 피접착제 두께가 다른 시편($t=0.1\text{mm}$)과 접착 두께가 다른 시편($h=2.5\text{mm}$)을 대상으로 실험을 하여 피로강도를 구하였다. Fig. 5와 Fig.6에서는 모든 접착제와 피접착제의 종류에 대하여 각기 다른 피접착제의 두께와 접착제 두께에 따른 피로수명과 하중진폭을 나타내고 있다. 각 접착제간의 강도의 차이가 심하여 접착제마다 하중진폭을 다르게 설정하였다. DP460, Araldite

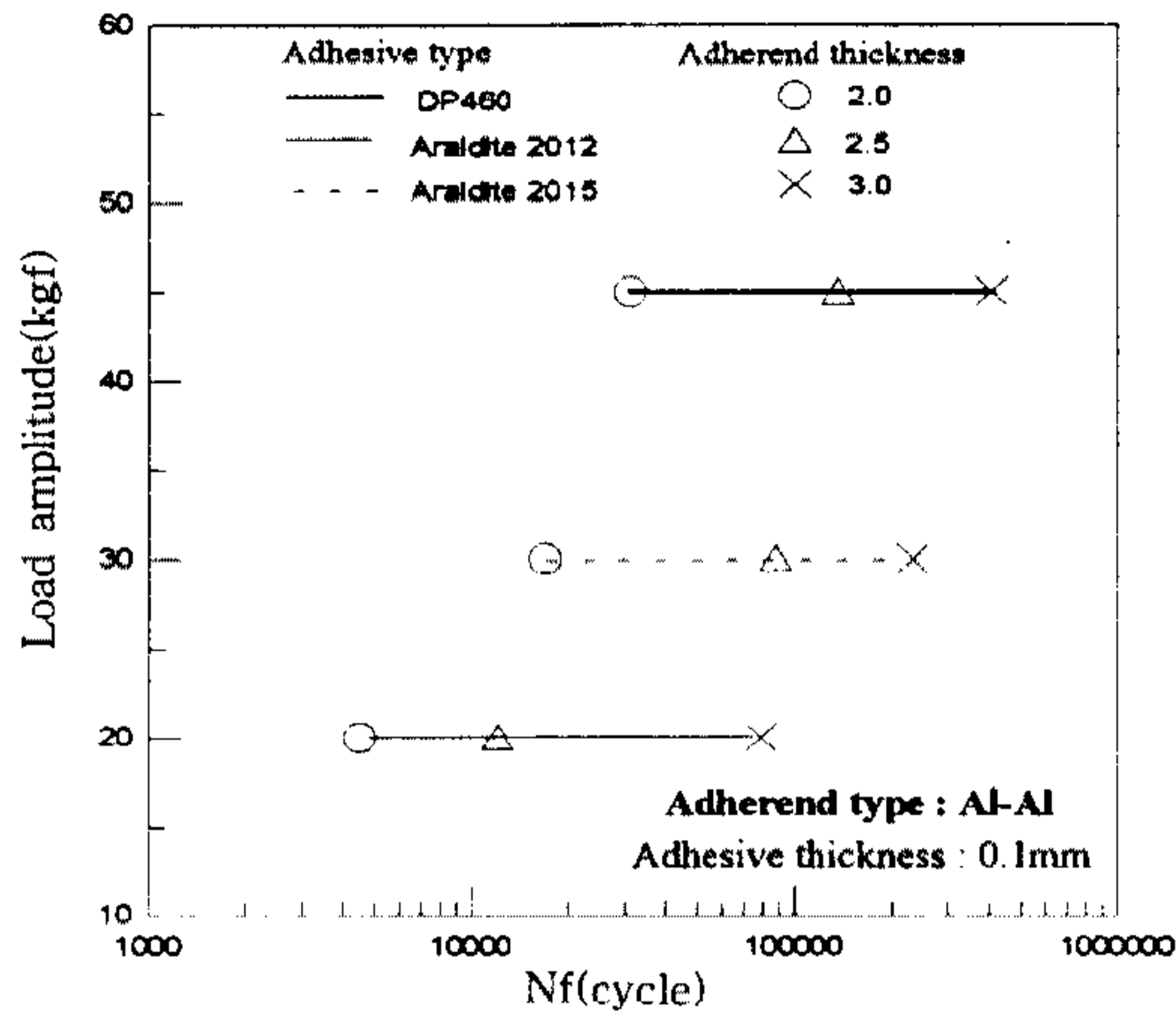
2015, Araldite 2012의 순서대로 높은 하중진폭임에도 불구하고 긴 피로수명을 보이므로 피로강도도 이러한 순서대로 강함을 알 수 있다.

2.3 리벳으로 보강된 접착에 의한 접합

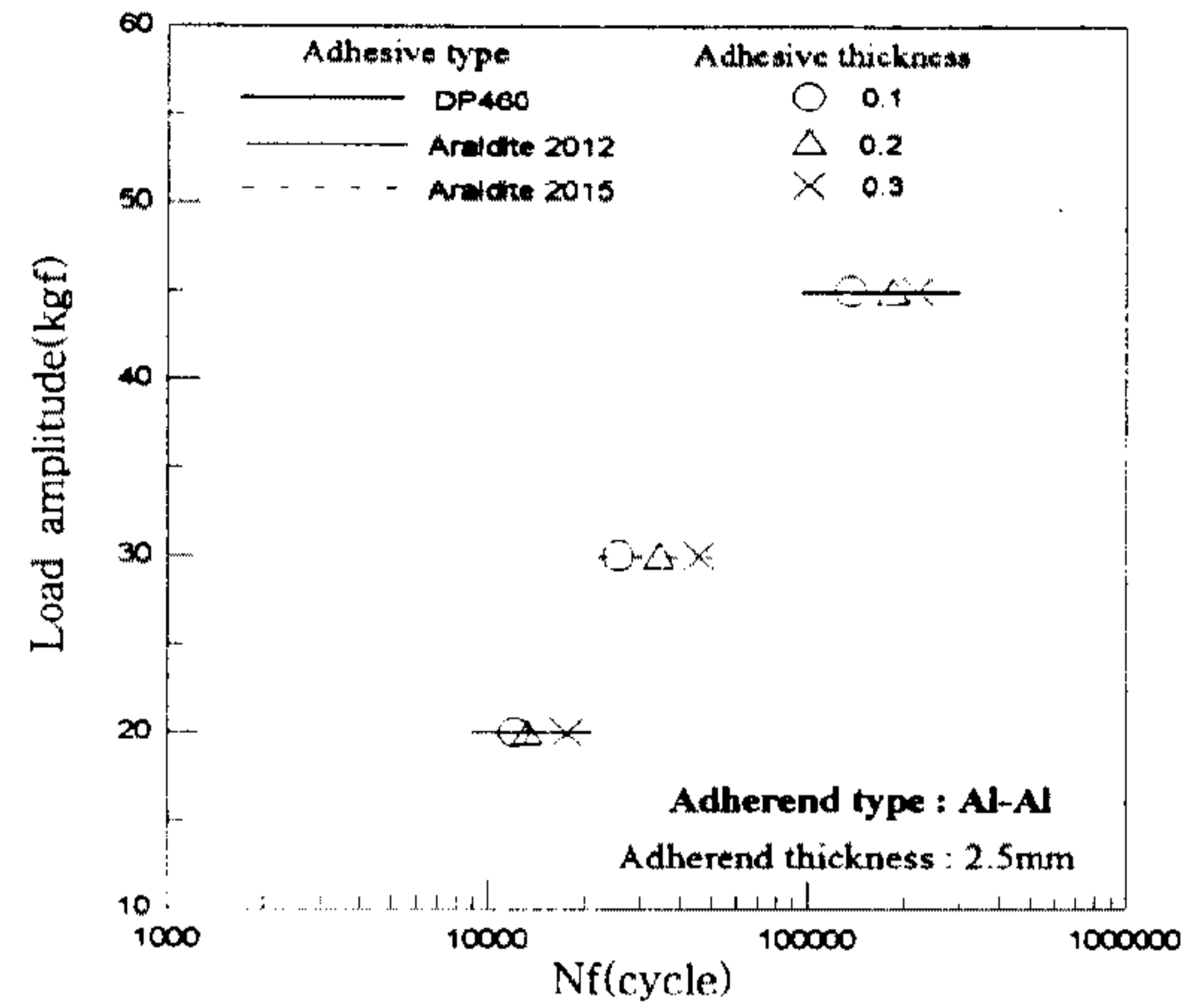
2.3.1 실험

1) 실험방법

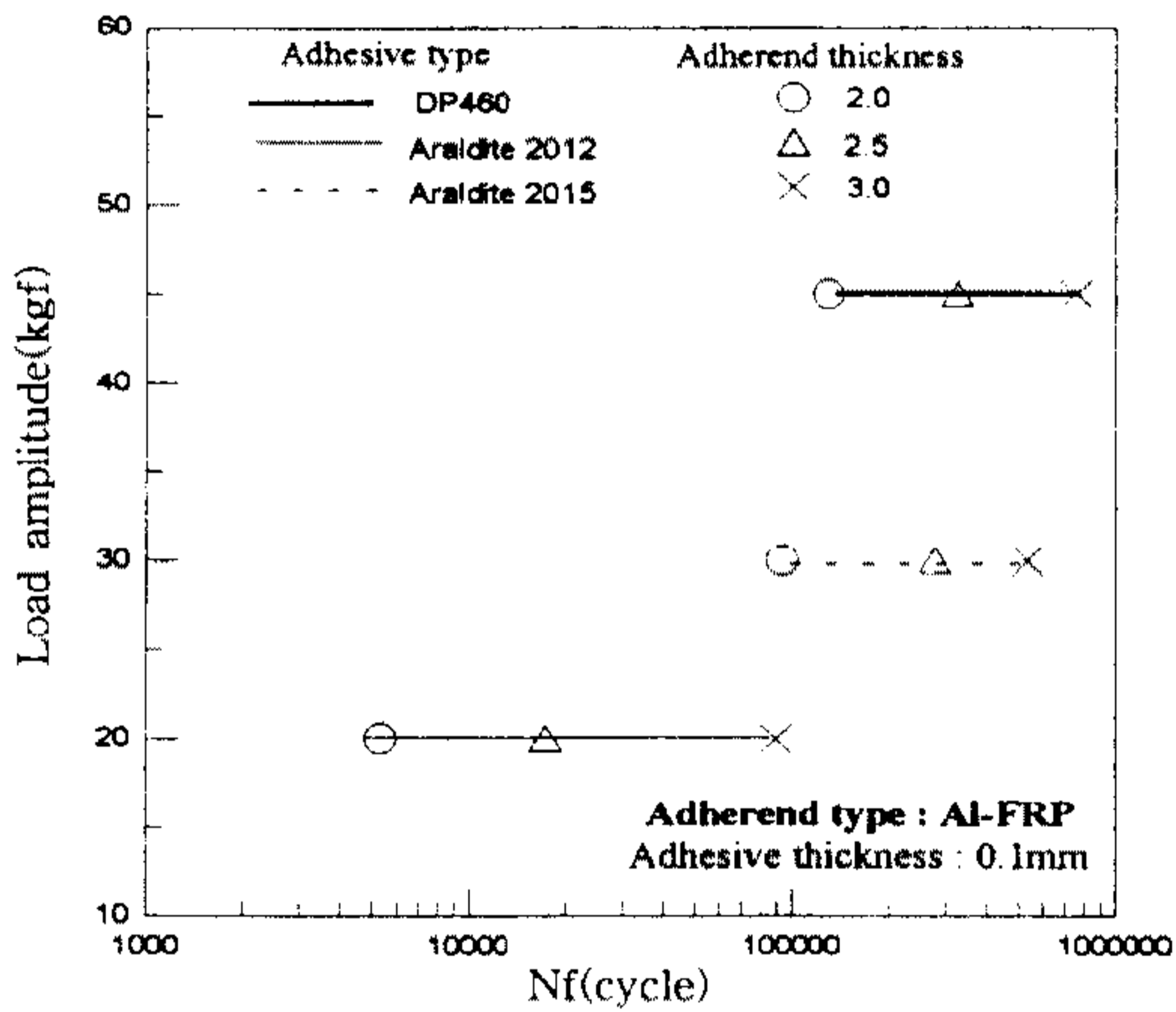
시편의 피접착재와 접착제는 2.2절과 동일하다. 단지 시편형상에서 차이는 접착 면의 중앙에 리벳으로 보강한 것이다. 리벳은 JIS B 4627¹⁸⁾ 규격에 준한 1D B-40048 리벳(직경 4.8mm)으로 알루미늄 합금 JIS A5154¹⁹⁾로 되어 있다. 그 이외



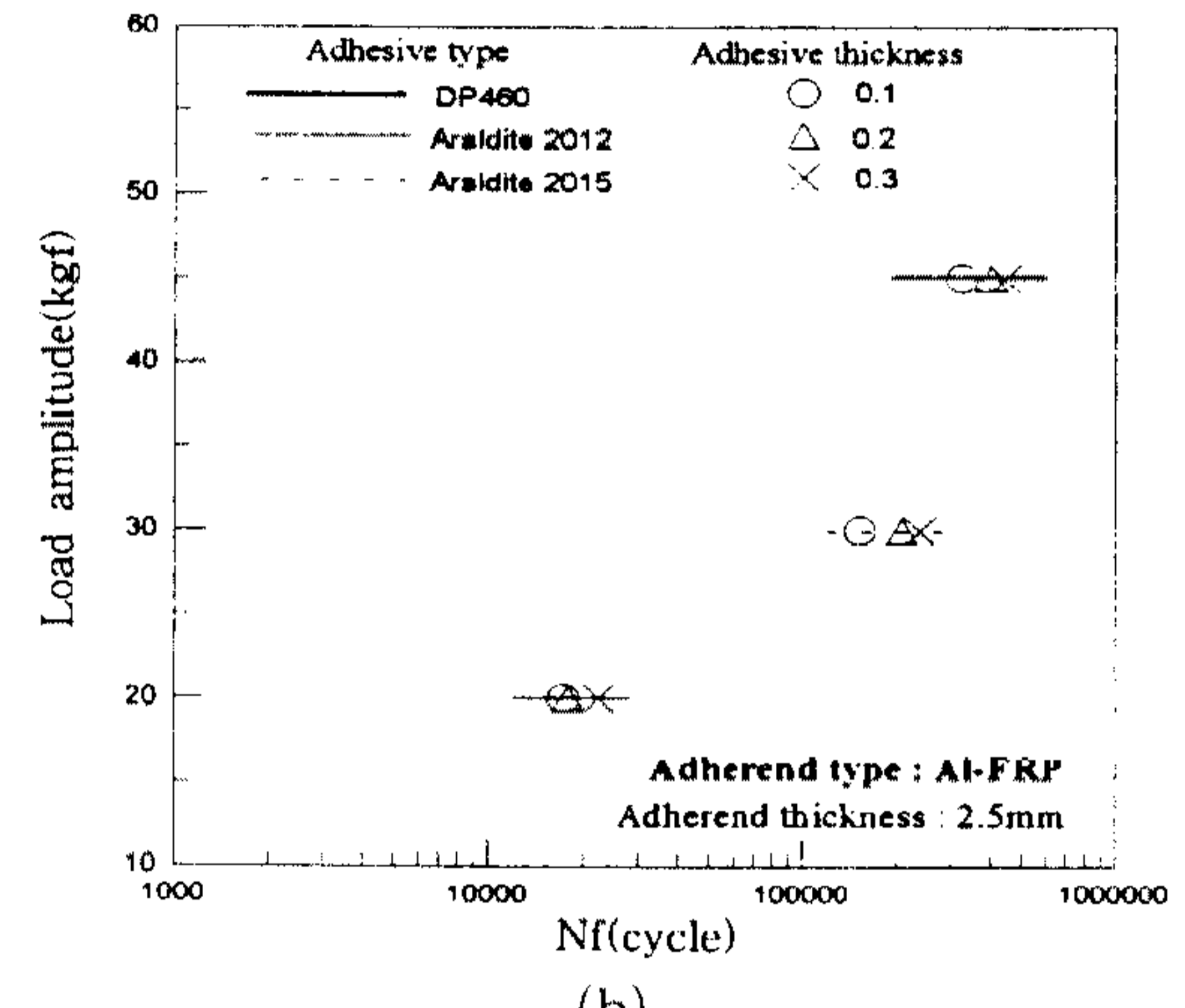
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig.5 Comparison of fatigue strengths for various adhesives and adherend thicknesses

Fig.6 Comparison of fatigue strengths for various adhesives and their thicknesses

의 실험방법은 2.2절과 동일하다. 리벳이 없는 경우와의 차이점은 하중진폭과 평균 하중을 모든 접착제에 대해서 35kgf로 한 것이다. 이렇게 한 이유는 피로수명의 상당한 부분이 리벳의 강도에 의한 것이어서 접착제간의 피로수명의 차이가 리벳이 없는 경우만큼 크지 않기 때문이다.

2) 시편의 파손양상

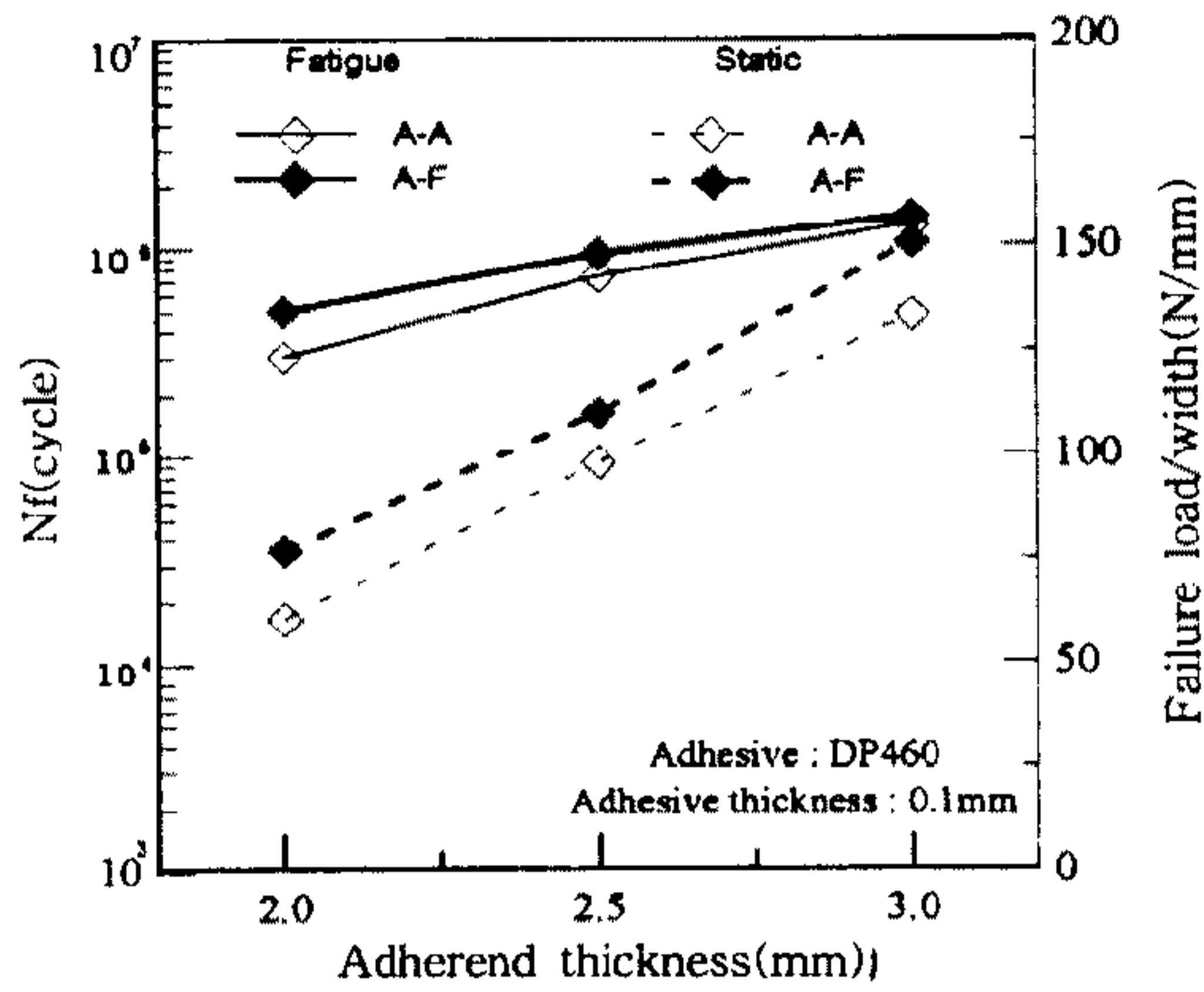
피로 실험에서도 역시 필렛부의 접착면이 파손될 때까지는 접착제의 피로 강도에 따라 각기 다른 피로수명만큼 견딘 후 균열이 리벳에 이르렀을 때부터는 리벳의 강도에 의해 일정한 피로수명만큼 피로하중을 견디다가 파손되는 현상을 관찰할

수 있었다.

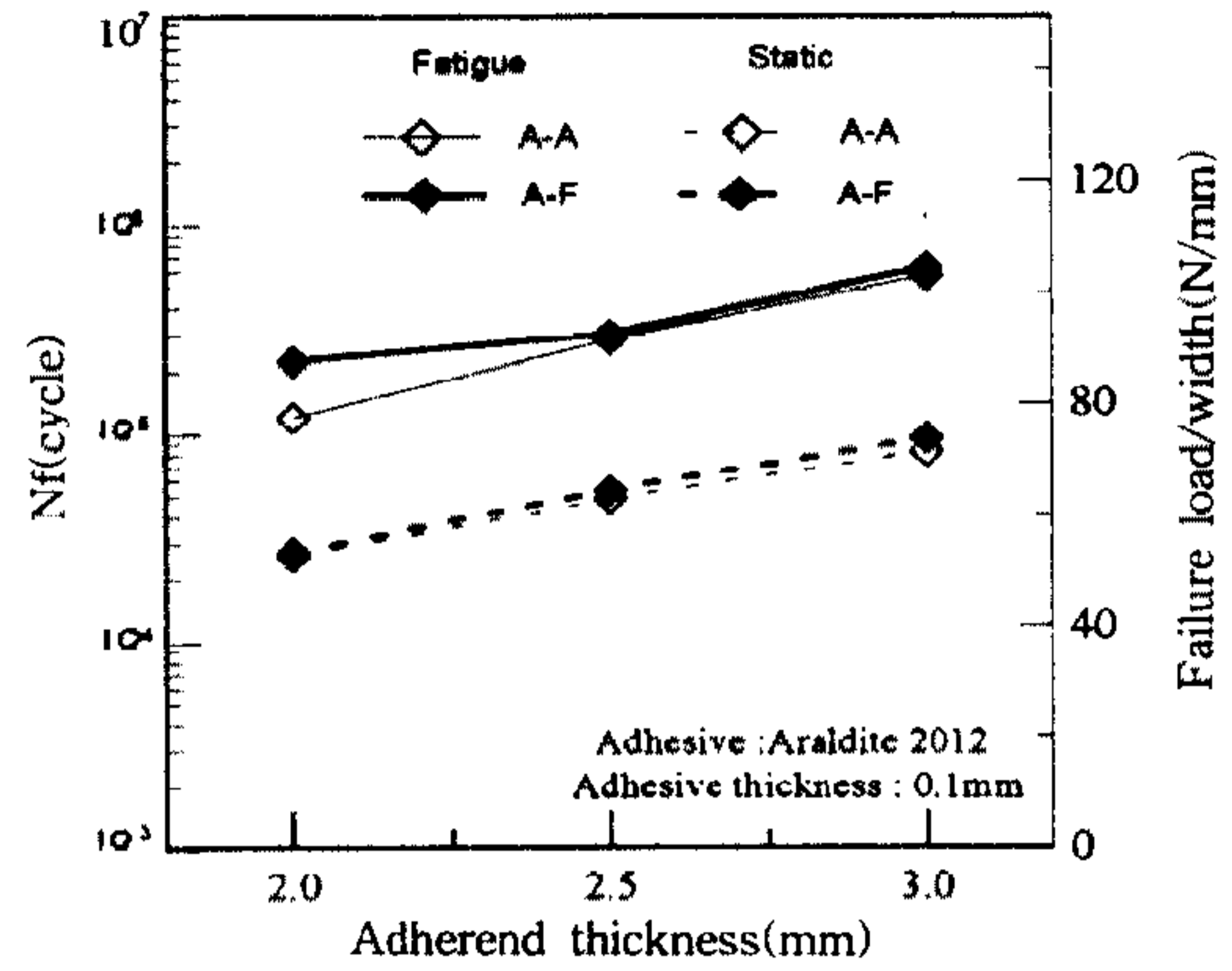
2.3.2 실험결과

1) 리벳 보강의 효과

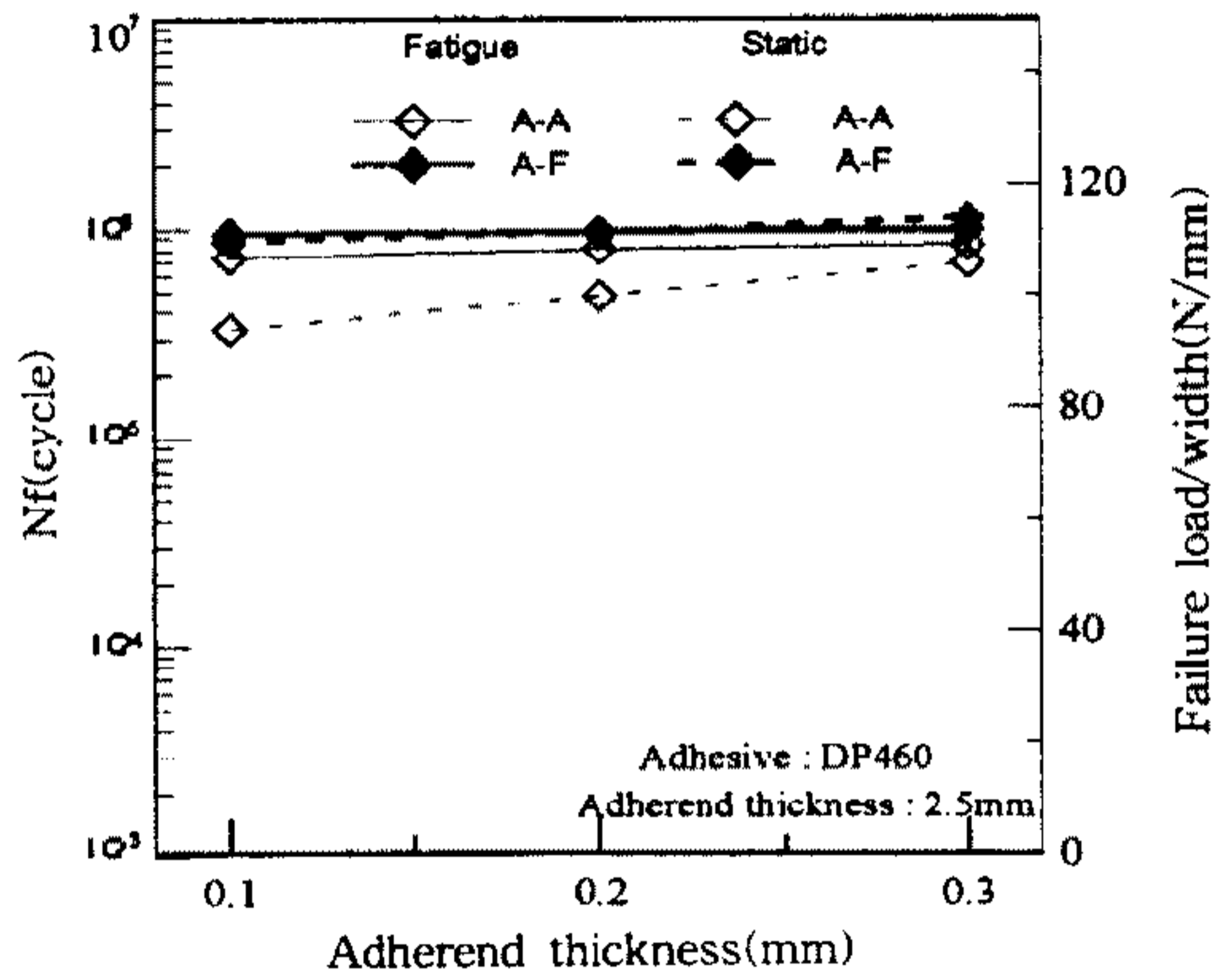
리벳으로 보강하지 않은 실험 결과(Fig.2~Fig.6)와 리벳으로 보강한 실험 결과(Fig.7~Fig.9)를 비교할 때 DP460은 리벳으로 보강하지 않은 경우 하중 진폭 45kgf에서 리벳으로 보강한 경우에는 하중 진폭을 35kgf로 감소시켰으므로 비록 수명이 증가하였다도 리벳의 보강효과를 말할 수 없지만 Araldite 2012와 Araldite 2015의 경우는 하중진폭을 증가시켰음에도 불구하고 피로수명이 커지므로 리벳으로 보강한 시편이 피로강도를



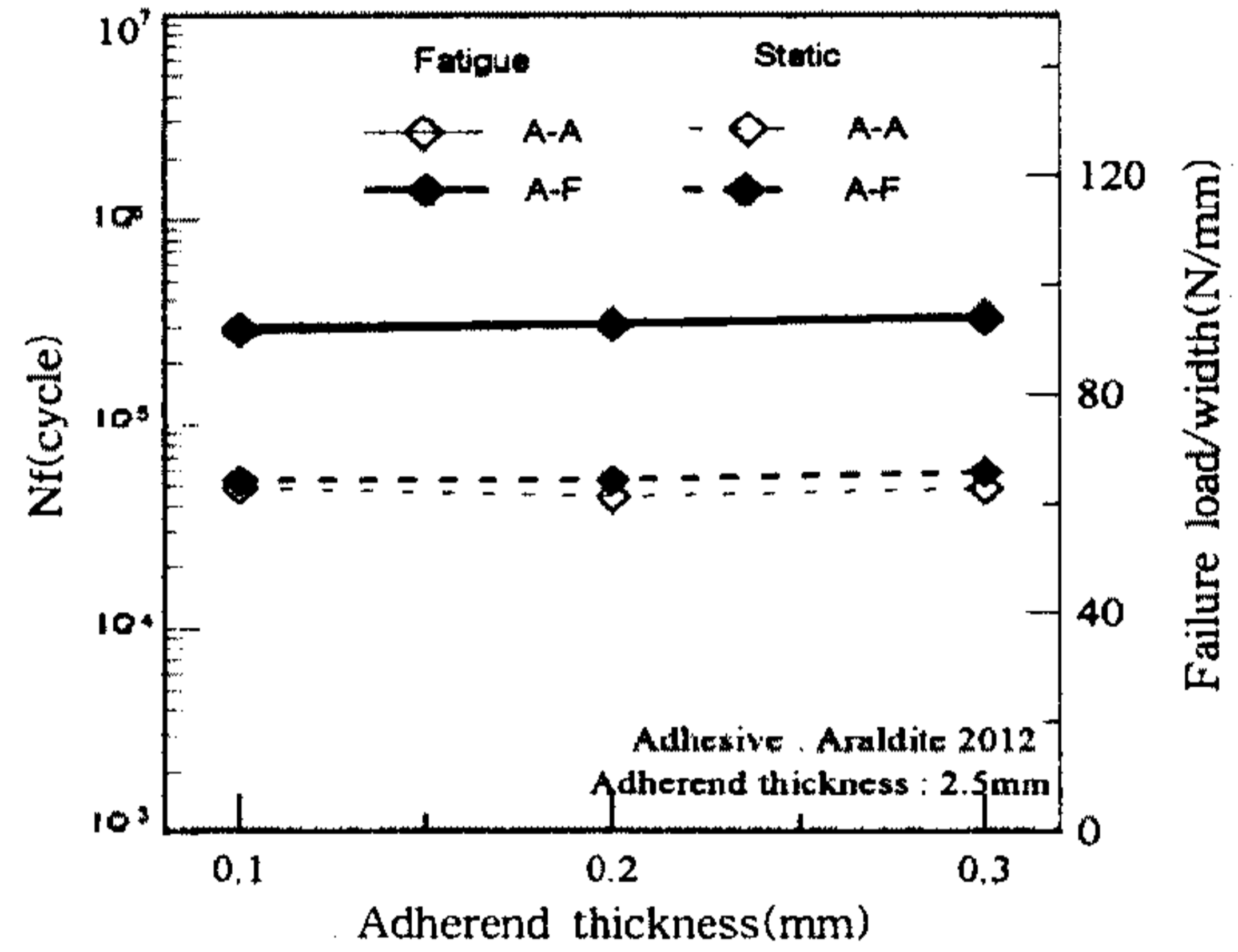
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig.7 Effect of riveting on fatigue strength for various adherend and adhesive thicknesses(Adhesive : DP460)

Fig.8 Effect of riveting on fatigue strength for various adherend and adhesive thicknesses(Adhesive : Araldite 2012)

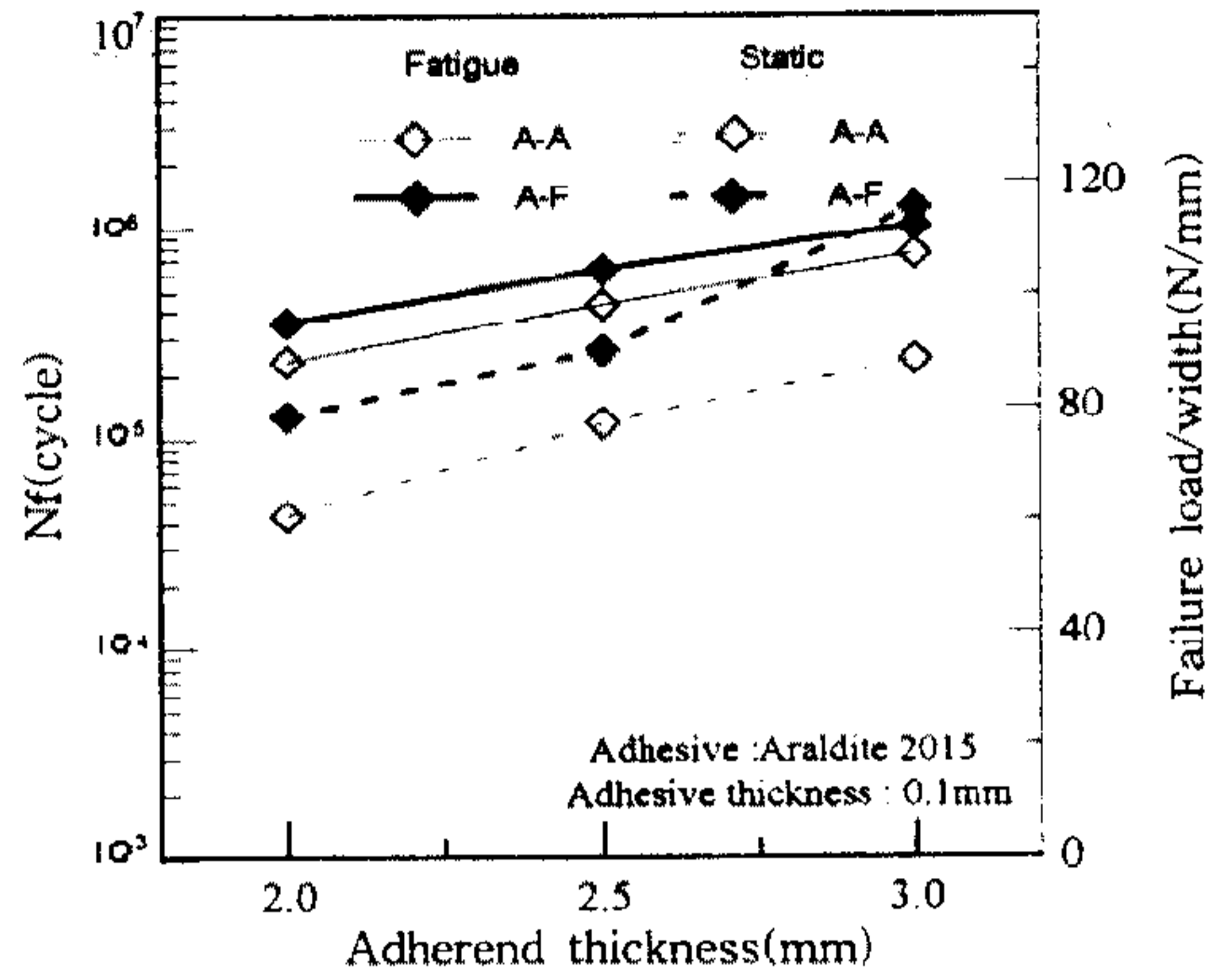
증가시킨다고 말할 수 있다.

2) 피접착재의 두께

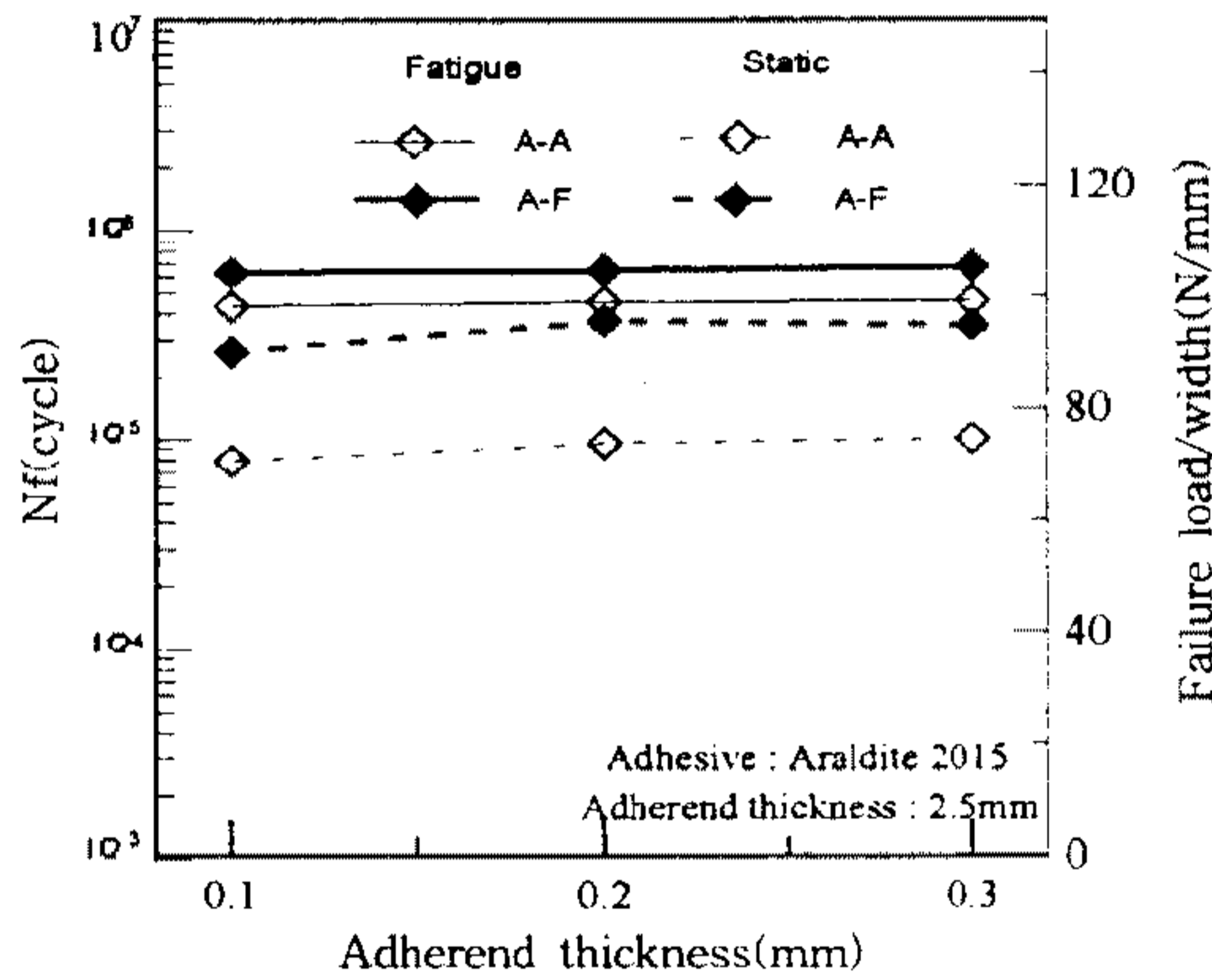
알루미늄-알루미늄 시편과 알루미늄-복합재 시편에 대하여, 피접착재두께가 다른 시편($t=0.1\text{mm}$)을 대상으로 실험을 하였다. 각각 다른 접착제 종류에 대해 리벳으로 보강된 정하중 실험 결과와 비교하였다(Fig.7(a)~Fig.9(b)). 피접착재 두께가 증가함에 따라 피로강도가 증가하였다. 피로강도의 피접착재 두께에 따른 영향은 정하중 실험 결과의 경향과 같게 나타났다. 또한 리벳으로 보강하지 않은 실험 결과(Fig.2~Fig.4)와 비교할 때 피접착재 두께에 따른 영향은 리벳으로 보강하지 않은 시편에 대한 실험결과의 경향과 같게 나타났다.

3) 접착 두께

알루미늄-알루미늄 시편과 알루미늄-복합재 시편에 대하여, 접착두께가 다른 시편($h=2.5\text{mm}$)을 대상으로 실험을 하였다. 각각 다른 접착제 종류에 따라 리벳으로 보강된 정하중 실험 결과와 비교하였다(Fig.7(a)~Fig.9(b)). 접착 두께가 증가함에 따라 피로수명은 거의 변화가 없거나 약간 증가하였다. 피로강도에 대한 접착 두께에 따른 영향은 정하중 실험 결과의 경향과 같게 나타났다. 리벳으로 보강하지 않은 실험 결과(Fig.2~Fig.4)와 비교할 때 접착 두께에 따른 영향은 리벳으로 보강하지 않은 시편의 실험결과의 경향과 같게 나타났다.



(a)



(b)

Fig.9 Effect of riveting on fatigue strength for various adherend and adhesive thicknesses(Adhesive : Araldite 2015)

4) 피접착재의 종류

리벳으로 보강한 시편에 대해 접합 강도에 대한 피접착재의 종류의 영향을 평가하기 위하여, 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편에 대하여 피접착재 두께가 다른 시편($t=0.1\text{mm}$)과 접착 두께가 다른 시편($h=2.5\text{mm}$)을 대상으로 실험을 하여 피로수명을 구하였다(Fig.7~Fig.9). 각각 다른 접착제 종류에 따라 리벳으로 보강된 정하중 실험 결과와 비교하였다. 전반적으로 알루미늄-복합재 시편이 알루미늄-알루미늄 시편보다 강도면에서 우수한 경향은 정하중 실험 결과의 경향과 같게 나타났다.

3. 결 론

전기자동차 차체 경량화를 위해 알루미늄과 복합재료의 접착 설계조건을 제시하고자 T형 접착 이음 시편으로 여러 가지 설계변수하에서 피로하중 실험을 한 결과는 다음과 같다.

- 1) 접착에 의한 접합에서 피접착재 두께는 피로 강도를 크게 증가시킨다.
- 2) 접착 두께가 증가함에 따라 피로 강도는 약간 증가하거나 거의 영향이 없다.
- 3) 피접착재는 알루미늄-복합재가 알루미늄-알루미늄의 경우보다 피로 강도 면에서 우수하다.
- 4) 접착에 의한 접합을 알루미늄 리벳으로 보강한 경우 피로 강도를 증가시켜 준다.
- 5) 접착에 의한 접합을 알루미늄 리벳으로 보강한 경우, 접착만으로 이루어진 경우와 비교시 피접착재 두께와 접착두께, 접착제의 종류에 따른 피로 강도의 변화경향이 유사하다.

후 기

본 연구는 통산산업부 G7 과제(차세대 자동차 기술) 개발 사업으로 수행되었으며 대우자동차주식회사의 연구비 지원과 고등기술원의 우형표 주임 연구원의 도움이 있었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이강용, 김준범, 최홍섭, 우형표, "단면 겹치기 이음 시험에 의한 경량 구조물용 접착이음 강도의 평가", 한국 자동차 공학회 논문집, 제5권, 제2호, pp. 87~93, 1997.
2. 이강용, 김종성, 공병석, 우형표, "차체 접합과 관련한 접합 강도 평가", 한국 자동차 공학회 추계 학술 대회 논문집, 제1권, pp. 189~194, 1996.
3. S. Krenk, J. Jönsson and L. P. Hansen, "Fatigue Analysis and Testing of Adhesive Joints", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 53, No. 6, pp. 859~872, 1996.

4. D. A. Bigwood and A. D. Crocombe, "Elastic Analysis and Engineering Design Formulae for Bonded Joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, pp. 229~242, 1989.
5. W. T. Chen and T. F. Falvin, "Mechanics of Film Adhesion: Elastic and Elastic-Plastic Behavior", *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 16, pp. 203~213, 1972.
6. A. N. Gent and G. R. Hamed, "Peel Mechanics for an Elastic-Plastic Adherend", *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 2817~2831, 1977.
7. I. Pearson, "Adding Welded/Mechanical Fastening to Adhesive-Bonded Joints", *Automot. Eng.(London)*, Vol. 20, No. 4, pp. 24~25, 1995.
8. D. Nardini and A. Seeds, "Structural Design Considerations for Bonded Aluminum Structured Vehicles", *SAE paper 890716*, 1989.
9. M. D. Gilchrist and R. A. Smith, "Static Strength and Fatigue Performance of Aluminum-Adhesive T-Peel Joints", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 208, pp. 33~40, 1994.
10. M. D. Gilchrist and R. A. Smith, "Fatigue Growth of Cohesive Defects in T-Peel Joints", *Journal of Adhesion*, Vol. 42, pp. 179~190, 1993.
11. 이강용, 공병석, 우형표, "T형 이음 접합에 의한 경량구조물용 접착이음강도의 평가", *한국자동차 공학회 논문집*, 제6권, 제4호, pp. 56~65, 1998.
12. SAE J1863, Coach Joint Fracture Test.
13. ASTM Designation E 466-82, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials".
14. ASTM Designation E 468-90, "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials".
15. ASTM Designation E 467-76, "Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Loads in an Axial Load Fatigue Testing Machine".
16. ASTM Designation E 606-80, "Standard Recommended Practice for Constant Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing".
17. ASTM Designation E 739-80, "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(e-N) Fatigue Data".
18. JIS B 4627, Hand Riveter, 1994.
19. JIS H 4000, Aluminum and Aluminum Alloy Sheets and Plates, Strips and Coiled Sheets, 1988.