

단일접침 접착제 접합부의 응력분포와 강도평가

이 중 삼* · 임 재 규** · 김 연 직***

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술 연구소

*** 전북대학교 기계공학부

Stress Distribution and Strength Evaluation of Adhesive Bonded Single-lap Joints

Zhongsen Li*, Jae-Kyoo Lim** and Yon-Jig Kim***

*Graduate school, Dept. of Mechanical Eng., Chonbuk Nat'l Univ., Chonju 561-756, Korea

**Dept. of Mechanical Design., Automobile Hi-Technology Research Institute Chonbuk Nat'l Univ., Chonju 561-756, Korea

***Dept. of Mechanical Design., Chonbuk Nat'l Univ., Chonju 561-756, Korea

Abstract

Recently, adhesive-bonding technique is widely used in manufacturing structures. Stress and strain analyses of joints are essential to design adhesive-bonded joints structure. The single-lap adhesive joint is the design dominating the range of adhesive joints.

In this study, single-lap specimens with different joint dimensions were used for the tensile-shear test and finite element calculation in order to investigate the effect of overlap length and adhesive-bonding thickness on adhesive strength and stress distribution of the joints. Consequently, it was found that overlap size and thickness can be important parameters for design of structure joints using adhesive bonding, which is effected on adhesive strength.

(Received March 29, 2001)

Key Words : Adhesive bonding, Adhesive strength, Adhesive thickness, Overlap length, Stress distribution, Tensile-shear strength

1. 서 론

접착제 접합 구조물의 설계에 있어서 접합부의 응력 및 변형률에 대한 분석은 필수적이다. 그러나 일반적으로 일정한 하중 하에서 접합부의 실제 응력은 전단 응력과 인장응력의 복합적인 상태에 있으며, 또한 재료의 불 균일성, 응력집중, 국부적인 크립, 항복 및 파괴 등 각종 인자의 영향을 받으므로 그것에 대한 응력 해석 및 강도평가는 아주 어렵다.

지금까지 진행된 접착제 접합부의 응력분석은 크게 해석적인 방법과 유한요소법에 의해 진행되어 왔다. 초기의 이론해석은 1938년 O.Volkerson¹⁾의 단일접침 시편 접합부의 응력분포에 대한 해석으로서 그는

접착제와 피착재를 모두 완전탄성체로 가정하였고, 시편 두께 및 접착층 두께에 의한 모멘트의 영향은 무시하였다. 그후 M.Goland와 E.Reissner²⁾는 단일접침 접합부에 작용하는 모멘트에 의해 피착재는 굽힘변형이 발생하고, 접착층에서 수직응력을 유발시키는데 근거하여 모멘트의 작용을 고려한 해석적인 해를 제시하였다. 1981년 와서 F.Dalale³⁾등은 두께, 물성치 등이 다른 접착제 접합이론을 제시함으로써 피착재의 물성에 따른 응력분포의 비대칭 문제를 해결하여 이론해석방법에 크게 기여하였다. 그러나 이론해석 방법은 접합부 응력의 특이성 및 영향요인의 복잡성으로 말미암아 정확한 이론적 해를 구하기 어렵다.

유한요소법은 수치해석방법으로서 분석하고자 하는 대상체를 일정한 크기의 요소로 분할하고 힘과 변위의

연속성에 근거하여 서로 인접한 요소들을 연결시키고, 일정한 경계조건을 대입하여 접합접합부 응력분포를 분석하는 방법이다. 복잡한 형태의 접합부도 적당한 요소분할에 의해 분석이 가능하나, 정확한 응력분포 및 응력 값을 구하기 어려우며, 접합부 내부의 실제 상황을 반영하지 못하는 경우도 있다. 또한 어떠한 경계조건이 변하더라도 다시 계산해야 하는 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 실험에 의한 실증과정을 통하여 접착제 접합부 설계에서 중요한 고려인자들인 접합제 두께와 겹침길이의 변화가 접합강도에 미치는 영향에 대하여 고찰하고, 유한요소 분석에 의한 응력해석을 통하여 접착제 두께와 겹침길이가 응력분포에 미치는 영향을 분석함으로써 접합강도와 응력분포의 상호관계를 실험적인 방법과 유한요소 해석을 결합시키는 방법으로 고찰하였다. 이러한 실험결과와 해석결과를 이용하여 접합부의 설계에서 있어서 중요한 인자들인 접착제 두께와 겹침 길이의 최적 값을 구하여 접합구조 설계 시 기초적 자료로 활용하고자 한다.

2. 시편 및 실험방법

2.1 시편

본 연구에 이용된 시편의 재료는 자동차 차체에 사용되는 1.2mm 냉연압연강판(SPPC)이다. 시편은 ASTM D1002-944에 근거한 단일겹침 형식이며, 겹침부 길이는 각각 8, 12, 18, 25mm 등 4 가지로 하였다. 서로 다른 접착제 두께를 얻고자 무게가 다른 중량추로 접합부를 가압한 상태에서 접착제를 경화시켰다. 접착제 두께의 측정은 시편의 접합부 겹침 길이를 5등분으로 절단하여 단면을 2000#의 사포로 깨끗이 연마한 후, 광학현미경 하에서 관찰하고, Bnipius 프로그램에 의해 각 절단면에서 균일한 거리로 10점을 취하여 상응한 두께 수치를 얻었고, 이들 수치들의 산술평균치를 각 시편의 두께로 간주하였다. 두께의 오차범위는 약 ±2%이다. 시편의 제작조건은 Table 1에 나타내었고, 시편형상은 Fig. 1에 보여주었다.

Table 1 Condition of specimens for design

	kinds of specimens						
	0.125	0.25	0.50	0.75	1.00	3.00	6.00
Mean pressure (kgf/cm ²)							
Adhesive thickness (μm)	118	112	106	98	92	88	86
Overlap length (mm)	8	12	18	25			

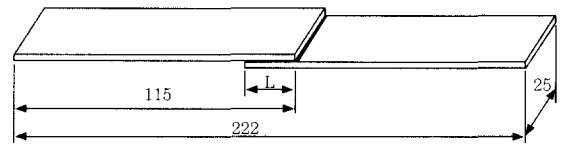


Fig. 1 The adhesive bonded specimen

2.2 시험방법

본 연구에서는 접합부 겹침길이 및 접착제 두께가 강도에 미치는 영향을 고찰하고자, 앞에서 언급한 시편들에 대하여 인장전단 시험을 진행하였다. 시험에는 Instron사의 만능시험기가 이용되었고, 하중속도는 시편의 인장전단특성에 따라 상대적으로 작은 0.2mm/min으로 하였다.

2.3 시편의 유한요소 모델링

접착제 접합 시편에 인장전단하중을 가하였을 때, 접합부에 나타나는 응력분포로부터 응력집중의 위치 및 크기를 계산하고 접착제 두께 및 겹침길이의 변화에 따른 응력집중도의 변화를 고찰하고자, 본 연구의 시편(Fig. 1)에 대한 유한요소 모델링을 Fig. 2와 같이 생성하였다. 그림에서 X, Y, Z는 각각 시편의 길이방향, 접합부에 수직된 방향과 접합부에 수평된 방향을 나타낸다. 해석에 사용된 탄성계수(Young's modulus)와 프아송비(Poisson's ratio) 등 물성치들은 접착제와 피착재 강판을 각각 인장시험 하여 얻었고 결과는 Table 2에 정리하였으며 이들을 모델에 적용하였다. 경계조건은 해석하려는 접합부의 내부에 구속이 걸리지 않도록 시편 양끝에 Fig. 2와 같이 주었다. 본 해석은 8개 절점(node)을 가지고 있으며 자유도는 축방향에 대한 변위이다. 보다 좋은 해석결과를 얻기 위하여 2차원 솔리드 모델은 요소 445개, 노드 점 1465개, 3차원 솔리드 모델에서는 요소 3520개, 노드 점 4617개로 분할하고, 이것에 의해 접착제를 중심으로 응력이 집중되는 부위에 작고 많은 요소가 배치되게 하였으며 접착제가 파단되는 하중하도 내의 탄성영역만을 고려하여 선형탄성 해석을 진행하였다.

Table 2 Material constants of adhesive joints

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Adherend	210.0	0.30	120.8	300
Adhesive	2.70	0.33	56.7	61.3

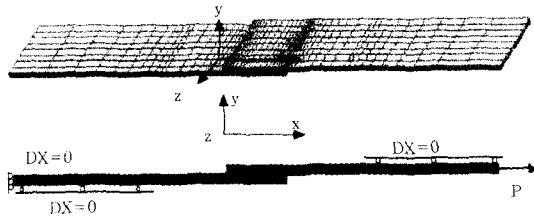


Fig. 2 FEM model and boundary condition

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 유한요소 해석결과

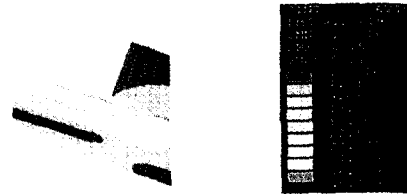
모델링한 시편에 일정한 외력을 가했다고 가정하고 얻어진 전체적인 변형형태는 Fig. 3(a)에 나타내었다. 단일접침 시편에 작용하는 모멘트의 영향으로 접합부를 중심으로 시편 양단이 서로 반대되는 방향으로 굽힘 변형이 발생하였다. 응력분포는 Fig. 3(b)에서 보여지는 것처럼 접침부 끝부분을 기준으로 접착제 쪽보다는 피착재 쪽에 더 심하게 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 인장하중을 받을 때 시편의 피착재 부분과 접합부의 변형률이 상이하기 때문인 것으로 사료된다. 즉 접합부에서 접착제는 피착재를 접착시킴으로서 접착제와 피착재는 상호 구속한다. 구속을 받는 영역에서 피착재의 변형률은 작으나 그와 인접한 비구속 상태에 있는 피착재의 변형률은 상당히 크게 된다.

일정한 범위 내에서 접합부의 겹침길이가 증가하면 시편이 감당할 수 있는 하중이 증가하므로 겹침부 끝단에 인접한 피착재의 변형률은 더욱 증가하여 소위 류더스 변형대를 형성한다. 류더스대가 형성되는 부분을 3차원 유한요소 모델로 해석한 결과, Fig. 4와 같이 초생달 모양의 변형영역을 확인할 수 있다. 그림에서 (a)와 (b)는 각각 접착제 층이 보이는 정면과 반대면의 변형률 분포에 따른 응력분포 상태를 보여준다.

접착제와 피착재 사이에 작용하는 축 방향 응력 σ_x , 접착면에 수직되는 박리응력 σ_y 및 접착면 내의 전단응력 τ_{xy} 의 분포는 Fig. 5와 같다. 접합부의 양 끝단에서 약 겹침길이의 1/4되는 구역에 응력이 집중되어 있으며 가장자리에서 최대치를 보였다. 또한 겹침 중심부의 응력 수준은 끝단의 그것에 훨씬 못 미치는 값을 보여 단일접침 형식의 접합부의 많은 부분은 하중부하에 있어서 접착제나 접착부 계면이 갖고 있는 충분한 강도만큼의 기여를 하지 못함을 알 수 있다⁵⁾. 접합부의 계면에 작용하는 각 방향의 응력 중, 하중 방향과 일치한 σ_x 응력이 가장 커 접합강도에 영향을 미치는 주요한 응력이라는 것을 알 수 있다. 즉 접합부 내부에서 발생하는 응력집중 영역의 최대치 σ_{max} 가 취약경계층의



(a) Deformation by tensile-shear loading



(b) Stress distribution on over-lap left end of specimen

Fig. 3 FEM analysis on adhesive bonded single-lap joints under tensile-shear loading (Overlap length 8mm, Adhesive thickness 100 μ m)

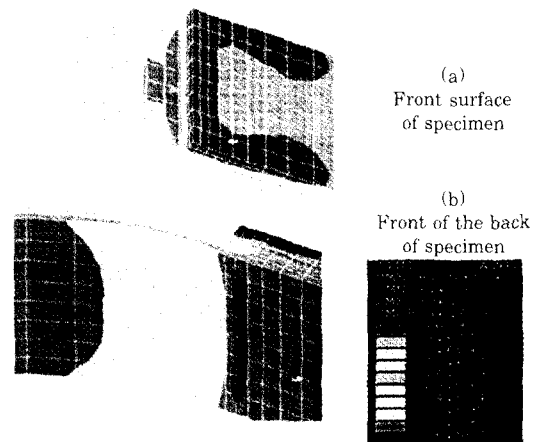


Fig. 4 Stress intensity contour by 3D FEM model

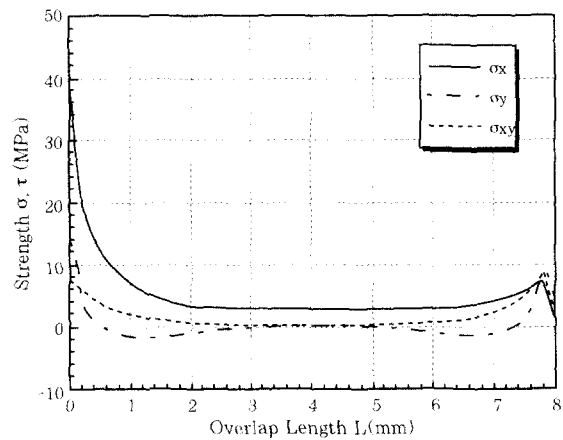


Fig. 5 Stress distribution along the shear plane as a function of distance from the edge of the overlap

파괴응력을 초과할 경우 이 부분에서 크랙이 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 취약경계층은 접착제와 피착재의 접합계면 또는 접착제 층 내부일수도 있으며, 일반적으로 접착계면이 취약한 것으로 알려져 있다⁵⁾.

3.2 접착제 두께 변화에 따른 강도평가

시험편의 실제 접합강도와 접착제 두께의 상호관계는 인장전단 시험을 통하여 고찰하였다. Fig. 6은 접착제 두께가 다른 4가지 시험편의 하중-변위선도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 접착제의 두께가 98 μm 에서 118 μm 까지 증가함에 따라 최대하중은 감소함을 알 수 있다. 그러나 접착제 두께의 감소가 어느 정도에 이르면 강도는 더 이상 증가하지 못하고 오히려 감소한다. 이에 대하여는 Fig. 7에 보였는데 접착제 두께의 증가가 접합강도에 서로 반대되는 영향을 미치는 한계두께를 갖고 있음을 시사하며, 본 연구에 이용된 접착제, 피착재 체계에서 그 한계두께는 약 95 μm ~100 μm 정도였다. 접착제 두께가 과도하게 얇을 경우 최악경계층은 거의 접착제와 피착재의 계면일 확률이 크기 때문에 강도가 오히려 저하되는 것으로 사료된다. 접착제의 두께와 강도사이의 상기와 같은 관계를 접합부의 응력분포 및 응력집중도로서 분석하고자 접착제

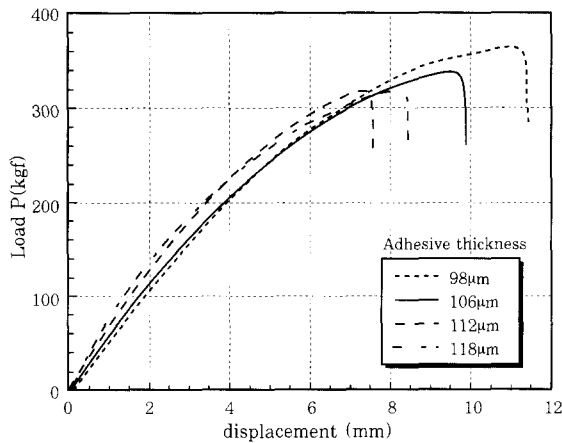


Fig. 6 The effect of adhesive thickness upon tensile-shear strength

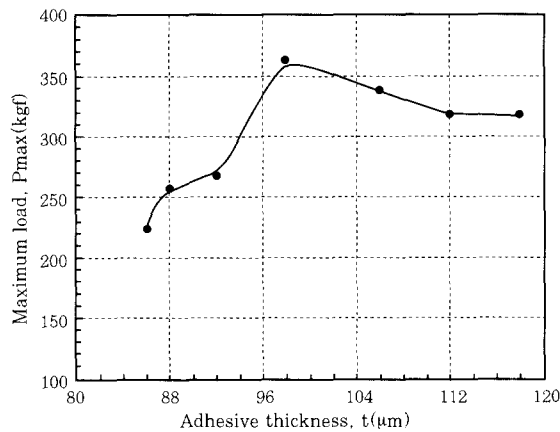


Fig. 7 The relation between adhesive thickness and maximum load in Tensile-shear test

두께를 각각 50, 100, 150, 200 μm 으로 가정하고 유한요소 해석을 진행하였다. Fig. 8은, 동일한 하중의 작용 하에서 접합부의 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 σ_x 응력이 각 시험편의 접합부에 분포된 상태 및 크기를 보여준다. 겹침부 끝단에 $\sigma_{x\text{max}}$ 가 분포되어 응력집중이 일어나는 것을 알 수 있으며, 또한 두께 50 μm 에서 가장 큰 분포 응력을 보여 응력 집중이 심하다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 x방향의 응력 집중도와 접착제 두께의 관계를 보여준다. 응력집중도는 겹침부에 분포된 최대인장응력 $\sigma_{x\text{max}}$ 과 평균인장응력 σ_0 의 비로서 표시된다. Fig. 9에서 접착제 두께가 증가할수록 응력 집중도는 감소하므로 접합강도는 증가되어야 한다. 실제로 Fig. 6에서 보여주는 것처럼 98 μm 이하에서는 두께가 증가할수록 강도는 증가하였다. 그러나 두께가 어떤 한계를 초과하면 접착제 내부의 결함이 동시에 증가하여 크랙을 유발하는 원인이 되기 때문에 응력집중 보다는 내부 결함이 강도저하를 야기 시키는 주요 원인이 된다⁶⁾, Fig. 6과 Fig. 7에서 접착제 두께가 98 μm 이상인 구간에서는 상기의 경향을 보여주었다.

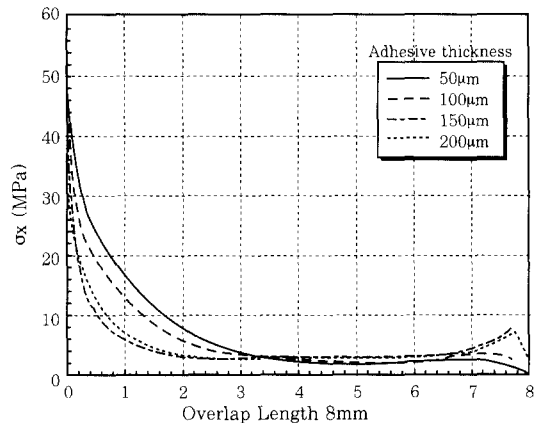


Fig. 8 The relation between adhesive thickness and σ_x distribution

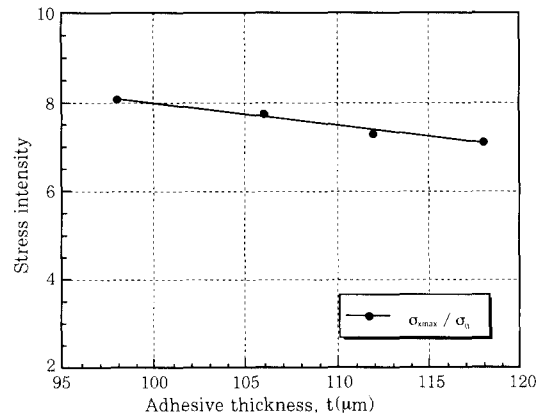


Fig. 9 The relation between adhesive thickness and stress intensity(σ_{xa})

3.3 겹침길이 변화에 따른 강도평가

접합부의 겹침길이를 변화시킨 시편에 대한 인장전단 시험결과는 Fig. 10에 정리하였다. 시험에 이용된 시편은 서로 다른 접착제 두께를 얻고자 접합부에 대한 압력을 각각 1kgf/cm^2 , 3kgf/cm^2 및 6kgf/cm^2 으로 조절한 3조의 시편들로서 겹침길이는 각각 8, 12, 18, 25mm로 변화시켰다. Fig. 10에서 가압력이 6kgf/cm^2 일 경우, 겹침길이 8~12mm까지는 약간의 증가를 보이고, 기타 가압력조건에서는 큰 변화를 보이지 않음을 볼 수 있다. 그러나 겹침길이가 12mm이상이면 강도가 급격히 저하되는 것을 보여 준다. 이는 접착제 접합에서 접합부의 강도는 접합부의 끝단의 접착강도에 의해 좌우되므로 접합면적의 증가가 접합하중을 비례적으로 증가시킬 수 없는데 기인된다. 겹침길이와 겹침부 응력분포의 관계를 알아보려고 유한요소 해석을 진행하였다. Fig. 11은 겹침길이와 응력분포의 관계를 종합한 것으로서 응력은 겹침부의 약 1/8~1/4정도 길이에 집중되고 겹침길이의 증가에 따라 접합부 끝단에 분포된 최대 응력이 증가함을 알 수 있다.

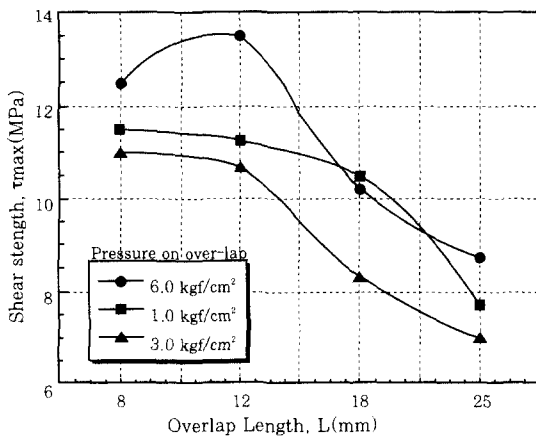


Fig. 10 The relation between overlap length and maximum load in tensile-shear test

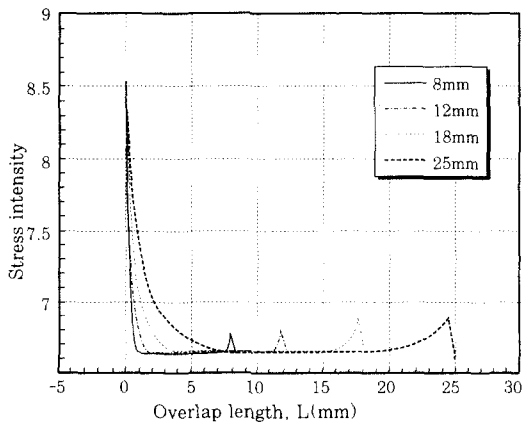


Fig. 11 The relation between overlap length and σ_x distribution

본 시험에서 사용한 4가지 겹침길이와 x방향 응력집중도의 관계는 Fig. 12에 나타내었다. 겹침길이의 증가에 따라 응력집중도가 증가함을 볼 수 있다.

겹침 길이 증가에 따른 면적의 증가 비율이 면적 증가에 따른 하중의 증가비율보다 크다. 이러한 관계는 단일접침 접합부 응력의 전체적인 분포에서 해석할 수 있다. 즉 접착층과 피착체에 작용하는 σ_x , σ_y , τ_{xy} 등 응력은 겹침부 끝단 근처에서 크게 나타나며 겹침부 대부분의 길이에서는 응력의 크기가 작아 부하를 감당하는데 큰 작용을 하지 못했다. 접합부가 파단 되는 것은, 접합부에 분포된 최대응력이 접착제, 피착재 체계에서 취약한 부분에서의 강도 임계값을 초과한 결과이며, 특정 접합부에 있어서 이 임계값은 일정하다. 따라서 특정 접합부에 있어서 임계 겹침길이 L_m 이 존재하며, 겹침길이 L 이 이 임계길이 L_m 을 초과하면 ($L > L_m$) 겹침부 중앙의 응력은 0이 되고, 겹침부 끝단의 최대응력이 파단응력이 될 수 있다⁶⁾. 겹침길이가 L_m 을 초과할 경우 하중은 더 이상 증가하지 않으며, 강도 저하만 초래하게 된다. 따라서 접착접합부의 구조 설계에 있어서 겹침길이를 증가시키는 방법으로 부하하중을 증가시키는 것은 비능률적이라는 것을 알 수 있다.

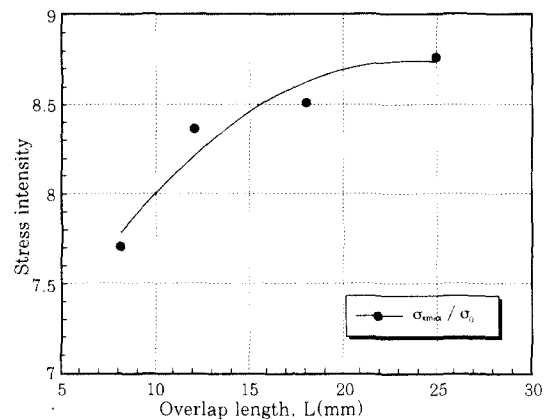


Fig. 12 The relation between overlap length and stress intensity (σ_x)

4. 결 론

본 연구에서는 접착제 두께와 겹침길이를 변화시킨 단일접침 접착제 접합시편에 대해 인장전단 시험 및 유한요소해석을 행한 후, 응력분포 분석 및 강도평가를 행하였다. 연구결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 접착제 접합을 적용한 단일접침 시편에 인장전단하중을 가하면 접침부 끝단에 대부분의 응력이 집중되어 있음을 유한요소 해석을 통해 확인할 수 있었고, 이것은

인장전단 시험을 통해 얻은 실증결과와 일치하였다.

(2) 일정한 범위까지는 접착제의 두께 증가에 따라 부하하중은 증가하나 100 μ m 이상에서는 오히려 감소하였다. 이것은 접착제가 두꺼울수록 응력 집중도가 낮으므로 일정한 범위에서는 두께의 증가에 따라 강도가 증가하지만 두께가 일정 값을 초과하면 접착제 내부 결함의 급격한 증가로 강도의 저하를 초래하기 때문이다.

(3) 겹침길이가 12mm 이상일 경우 접합부의 전단강도는 급격히 저하한다. 따라서 겹침길이가 어떤 한계 값 Lm에 도달하면 부하하중은 접합부의 면적의 증가에도 불구하고 더 이상 증가하지 않는다. 이는 대부분의 하중이 겹침길이의 약 1/8~1/4 되는 겹침부 끝단 부분에 부하 되고 있으므로 접합면적의 증가에 부하하중이 비례적으로 증가하지 않기 때문이다.

참 고 문 헌

- 1) O. Volkerson : die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, Vol.15(1938), 41~47
- 2) M. Goland and E. Reissner : The stress in cemented joints. Trans. ASME, J. Appl. Mech.(1944), A66, 17~27
- 3) F. Delale, F. Erdogn and M. N. Aydinaglu : Stress in adhesively bonded joints. A closed-form solution., J. Composite Materials, 15(1981): 249
- 4) ASTM Designation D 1002-94., 1998 Annual book of ASTM standards, Vol 15.06(Adhesives), 46
- 5) 溶接學會編 : 溶接·接合便覽, 丸善株式會社出版, 567~574
- 6) 金士九等編 : 合成膠粘劑的性質和性能測試, 科學出版社, 161~163