

접착이음의 파괴 기준 설정을 위한 연구

Establishment for Failure Criterion of Adhesively Bonded Joint

이 강 용*, 공 병 석**
Kangyong Lee, Byungseok Kong

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a criterion for predicting the failure strength of the joints bonded by ductile adhesives. To obtain a criterion, first, fracture tests were carried out for T-peel joint and Single-lap joint with widely differing joints geometries. Then using the fracture loads obtained at tests, the finite element analysis were performed, in which the stresses in the adhesive bonds were calculated in great detail. After examining four epoxy adhesives, it is concluded that the fracture of adhesively bonded joint occurs when the maximum of the ratio of the mean to effective stresses exceeds a constant value which can be determined from analysis and test for each adhesive.

주요기술용어 : Failure Strength(파괴 강도), Ductile Adhesive(연성 접착제), T-Peel Joint(T형 접착이음), Single-Lap Joint(단면 겹치기 이음), Failure Criterion(파괴 기준).

1. 서 론

일반적으로 널리 사용되는 기계 재료에 대한 구성 방정식에서는 재료의 항복에 미치는 평균 응력의 효과는 없다고 본다. 그러나 연성 재료(ductile material)에서는 미세기공(microvoid)이 생성되고 점차 성장하는 과정을 떠 버리며 파괴에 이르게 되고 이러한 물질에 대해서는 항복이나 기공(void)의 성장을 다룰 때 평균 응력의 역할을 고려해야 한다고 몇몇 논문(1,2)에서 다루고 있다. Thomason(3)에 의하면 기공 생성 변형률(microvoid-nuclea-

tion strain)은 평균 응력과 밀접한 관계가 있다고 주장하였다. 또한 Argon등(4)은 미세기공의 생성은 Von-Mises 응력과 평균 응력의 합에 영향을 받는다고 주장하였다. 기공의 성장에 관해서는 Rice(1)의 연구가 있는데 그는 연속체이론(continuum theory)을 이용하여 기공 성장률(void growth rate)이 재료의 항복응력에 대한 평균 응력의 비, σ_{mean}/σ_y ,에 지수적으로 비례함을 보였다. Sutton등(5)은 ARCAN시편의 균열 진전 방향을 예상하였는데 균열 선단의 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 값이 최대가 되는 방향으로 균열이 진전됨을 보여주었다. 이상의 연구들을 종합해보면 σ_{mean} 가 σ_{eff} 와 함께 연성파괴에 중요한 역할을 하는 것을 알 수

* 정회원, 연세대학교 기계공학과

** 정회원, 현대자동차

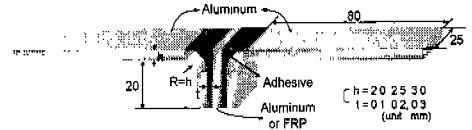
있으며 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 가 균열 진전방향과 관계있다면 바로 이것이 연성 재료의 파괴를 지배하는 중요한 인자가 될 수 있다고 확인하여 다양한 설계변수를 지닌 단면 겹치기 접착 이음과 T형 접착 이음에 대해 실험을 통하여 측정된 파괴 강도(failure strength)를 유한 요소법에 의하여 모델링한 것에 대입했을 때 접착층 내부에 나타나는 응력 분포를 면밀하게 조사한 후 피접착재의 재료와 접착부 형상에 관계없이 만족할 만한 파괴 기준을 이끌어 내는 것이 이 논문의 목적이다.

2. 실험

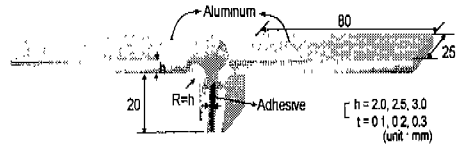
유한 요소 해석에 경계 조건으로 사용되도록 파괴 강도(failure strength)를 실험을 통해 측정하였다. 파괴 기준의 타당성을 충분히 검증하기 위해 접착 형태를 T형 접착 이음과 단면 겹치기 이음의 2가지로 하였고, 각 접착 형태에 대해서도 설계변수를 다양하게 변화시켜가며 실험하였다.

T형 접착 이음의 경우 해석과 실험에서 대상이 되는 설계 변수는 필렛의 유무, 피접착재의 종류, 피접착재의 두께, 접착 두께, 접착재의 종류로 설정하였다. 필렛이 있는 경우에는 피접착재의 종류를 2가지(알루미늄-알루미늄, 알루미늄-복합재)로 하였고, 필렛이 없는 경우에는 1가지(알루미늄-알루미늄)로만 하였다. 피접착재 두께, 접착 두께는 각각 3가지로 변화시켰고 접착재는 3가지에 대해서 각각 실험하였다.

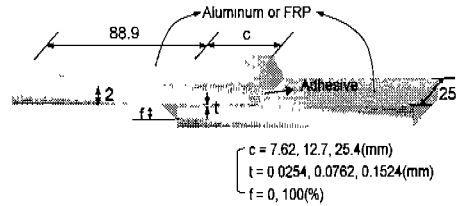
단면 겹치기 이음인 경우 해석과 실험에서 대상이 되는 설계 변수는 피접착재의 종류, 필렛의 유무, 접착 길이, 접착 두께로 설정하였다. 피접착재의 종류는 3가지(알루미늄-알루미늄, 알루미늄-복합재, 복합재-복합재)로 하였고 접착 길이, 접착 두께는 각각 3가지로 변화시켰다. 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다.



(a) T-peel joint(100% fillet)



(b) T-peel joint (0% fillet)



(c) Single-lap joint

Fig.1 Configuration of T-peel and Single-lap joints

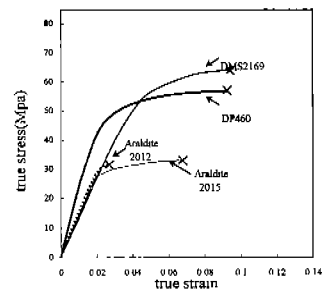


Fig.2 Stress-strain curves of adhesives

T형 접합 이음인 경우 피접착재로 사용된 알루미늄은 Al 5052-H32이고, 복합재는 FRP (Fiber Reinforced Plastic) DMS 2288(type

3, class 4, grade E)을 사용하였고, 접착제는 이액형, 상온경화 에폭시계열의 DP460, Araldite 2012, Araldite 2015를 각각 사용하였다. 이들 재료에 대한 특성을 Table 1 과 2 에 나타내었다. 특히 접착제의 물성치는 접착할 때와 같은 경화 조건하에서 ASTM D638(6)에 알맞은 형태로 경화시킨 시험편을 만든 후 인장 시험을 통해 구해냈다. 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 알루미늄 시편의 표면 처리는 산(acid)에칭과 연마법을 혼용하였으며 필렛이 없는 경우에 시편의 형상(Fig.1(b))은 SAE J1863(7)에 근거하였으나 필렛이 있는 경우에는 피접착제의 종류(Al-Al, Al-FRP)

Table 1 Material properties of Aluminum and FRP (10-13)

	Young's modulus	Poisson's ratio
Al 5052-H32	69.3 GPa	0.33
Al 6061-T6	73.1 GPa	0.33
DMS 2288	19.3 GPa	0.25

Table 2 Material properties of adhesives

Adhesive	Curing temp. (°C)	Young's modulus (at 25°C)	Poisson's ratio (at 25°C)
DP 460	23°C	1.85 GPa	0.40
Araldite 2012	23°C	1.35 GPa	0.41
Araldite 2015	23°C	1.25 GPa	0.41
DMS 2169 (type 2)	120°C	1.15 GPa	0.37

가 강도에 미치는 영향을 함께 보기 위하여 약간 변형된 형태의 시편형상(Fig.1(a))을 취하였다. 사용된 접착제는 모두 상온 경화용 접착제이므로 상온(23±2°C)에서 24시간이상 경화시켰다. 실험은 SAE J1863(7)에 준하여 상온에서 하중속도 1.3 mm/min로 하였다.

단면 결치기 이음인 경우 피접착재로 사용된 알루미늄은 Al 6061-T6이고, 복합재는 T형 접착 이음에서와 같은 DMS 2288(type 3, class 4, grade E)이며, 접착제는 epoxy 계열의 고온 경화용인 DMS 2169(type 2)와 상온 경화용인 DP460, Araldite 2015이다. 이들 재료에 대하여 Table 1~2에 나타내었다. 알루미늄 시편은 표면을 인산염(phosphoric acid)으로 처리한 후, 접착제와 함께 경화(curing)하여 제작하였다. 접착제가 DP460, Araldite 2015일 때는 상온에서 경화시켰지만 DMS 2169인 경우에는 120°C 경화 조건에서 행하여 졌다. 실험은 피착제의 종류에 따라 알루미늄+알루미늄 접착의 경우는 ASTM D 1002-72(80)에 준하여 시행하였고, 알루미늄+복합재, 복합재+복합재 접착의 경우는 ASTM D 3165-73(9)에 준하여 시행하였다. 실험은 상온에서 하중비 1.3 mm/min로 하였다.

3. 유한 요소 해석

앞서 수행된 실험 결과인 파괴 강도(Table 4)를 이용하여 유한요소해석을 행하였다. 실험에서 사용된 모든 접합종류에 대해서 행하였다. 해석에 사용된 S/W는 범용 유한 요소 해석 프로그램(pre-post processor겸용)인 NISA II 이며, 요소는 4절점 등매개변수(isoparametric) 요소를 사용하였고, 평면 변형률 상태로 가정하였다. 각 접합형태에 대한 유한 요소 해석 모델을 Fig. 3~Fig. 4에 나타내었다. 실험에서 측정된 파괴 하중(fracture load)을 경계조건으로 사용하였다.

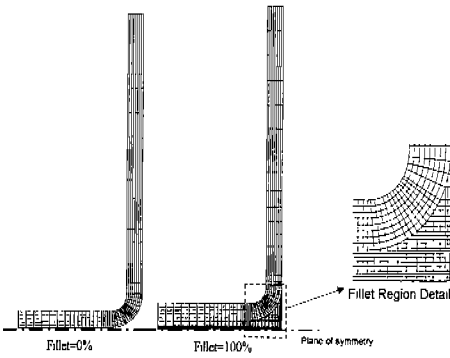


Fig.3 Finite element model of T-peel joint

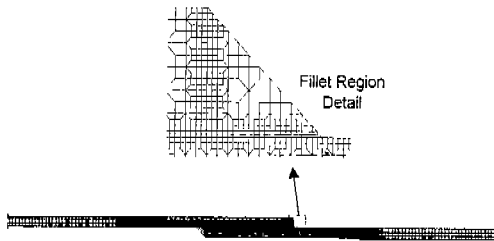
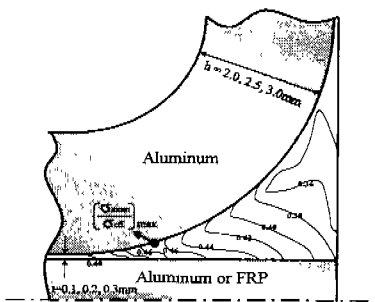


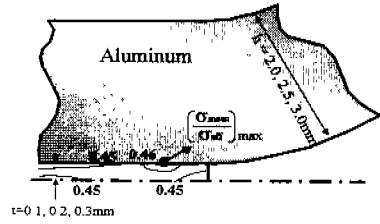
Fig.4 Finite element model of single-lap joint

4. 결과 및 검토

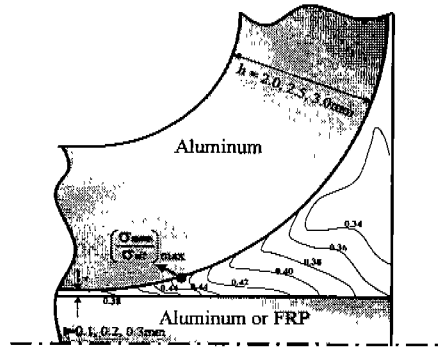
T형 접합 이음의 접착층 내부에서 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 의 분포 및 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 의 위치를 Fig. 5에 나타내었고 실험에서 측정된 파괴강도(파괴하중/시편의 폭(N/mm))및 계산된



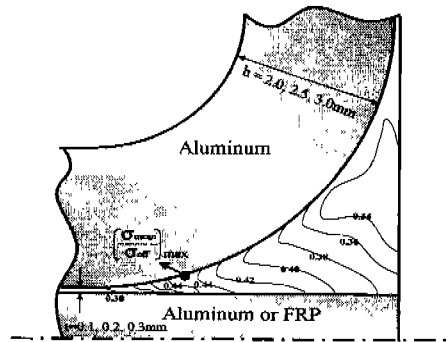
(a) Adhesive: DP 460, fillet=100%



(b) Adhesive: DP 460, fillet=0%



(c) Adhesive: Araldite 1212, fillet=100%



(d) Adhesive: Araldite 1215, fillet=100%

Fig.5 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ distribution in adhesive region of T-peel joints with different design parameters at failureload

$[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 을 Table 5와 6에 나타내었다. Fig. 5와 Table 3과 4를 살펴보면 각기 다른 피접착제 종류나 두께, 접착 두께에 따라 파괴강도가 크게 변화하는데도 불구하고 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 의 분포 및 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 의 위

치는 각 접착제에 따라 거의 일정함을 볼 수 있고 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 의 크기도 Araldite 2012를 제외하면 거의 일정함을 볼 수 있다. Araldite 2012가 다른 두 접착제 즉 DP460, Araldite 2015 보다 편차가 심한 것을 볼 수 있는데 Fig. 2에서 보듯이 취성이 강한 재료 이므로 연성재료에 적용되는 이론이 잘 맞지 않는 것 같다. 또한 필렛의 유무에 따라 접착층의 형상이 크게 달라짐에도 불구하고 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 은 일정한 값을 유지했다.

단면 겹치기 이음의 접착층 내부에서 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 의 분포 및 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 의 위치를 Fig. 6에 나타내었고 실험에서 측정된 파괴강도 및 계산된 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 을 Table5 ~ Table7에 나타내었다. 접착제가 DMS 2169인 경우는 T형 접합 이음에서 사용하였던 상온 경화용 접착제가 아닌 고온 경화용 접착제임에도 불구하고 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ 의 분포 및 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 의 위치는 피접착재 종류, 접착 길이, 접착 두께 등에 상관없이 각 접착제에 따라 거의 일정함을 볼 수 있다. T형 접합 이음에 비해서는 값의 편차가 약간 커졌다. 여기서도 역시 필렛의 유무는 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 에는 영향을 끼치지 못했다. 따라서 단면 겹치기 이음에서도 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 을 접착층의 형상에 관계없이 파괴 조건에 적용시킬 수 있겠다. 그러나 T형 접합 이음에 사용하였던 동일 접착제 즉 DP460, Araldite 2015를 몇 가지 단면 겹치기 접합 이음 시험편에 사용한 해석 결과(Table 7)를 살펴보고 이를 T형 접합 이음에서의 결과 Table 3과 비교할 때(Fig. 7), 동일 접착제임에도 불구하고 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 이 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 앞에서 필렛의 유무가 영향이 없었던 것을 고려하면 이는 접착부의 형상이 달라져서 그런 것보다는 하중방향이 달라진 것에 기인한다고 할 수 있다. 그러므로 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 을 파괴 조건에 적용시킬 때는 하중방향이 다른 접합 형태에 대해서는

다른 값이 되는 것을 알 수 있다.

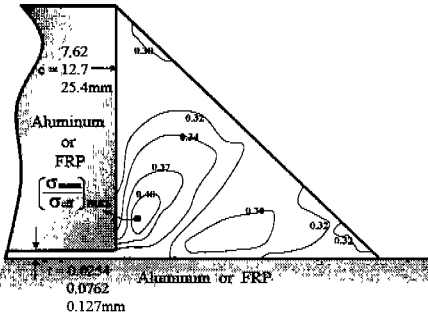
Table 4 Maximum value of $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ for various design parameters in T-peel joint(fillet=0%)

Adhesive	Adherend	h (mm)	t (mm)	Failure strength (N/mm)	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$
DP 460	Al + Al	2.0	0.1	11.76	0.4649	0.4650 deviation : 0.0002
			0.1	15.56	0.4653	
	2.5	0.2	16.47	0.4649		
		0.3	17.25	0.4647		
	3.0	0.1	21.56	0.4650		

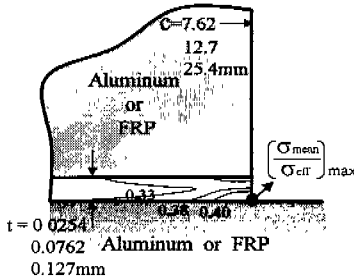
Table 3 Maximum value of $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ for various design parameters, adherends and adhesives in T-Peel Joint(fillet=100%)

Adhesive	Adherend	h (mm)	t (mm)	Failure strength (N/mm)	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$		
DP 460	Al + Al	2.0	0.1	47.04	0.4651	0.4648 deviation : 0.00027		
			0.1	65.07	0.4646			
		2.5	0.2	65.86	0.4645			
			0.3	66.64	0.4649			
	3.0	0.1	86.24	0.4653				
			2.0	0.1	56.84		0.4652	
	Al + FRP	2.5	0.1	84.672	0.4647			
				0.2	88.592		0.4648	
		3.0	0.1	95.648	0.4647			
				103.49	0.4645			
Araldite 2012	Al + Al	2.0	0.1	31.36	0.4516	0.4484 deviation : 0.00180		
			0.1	33.712	0.4488			
		2.5	0.2	35.28	0.4469			
			0.3	36.85	0.4470			
	3.0	0.1	54.09	0.4500				
			2.0	0.1	32.14		0.4482	
	Al + FRP	2.5	0.1	36.85	0.4500			
				0.2	38.42		0.4452	
		3.0	0.1	42.34	0.4470			
				57.23	0.4477			
	Araldite 2015	Al + Al	2.0	0.1	43.904		0.4468	0.4472 deviation : 0.00052
				0.1	54.096		0.4479	
2.5			0.2	54.88	0.4472			
			0.3	56.84	0.4467			
3.0		0.1	72.912	0.4479				
			2.0	0.1	68.208	0.4468		
Al + FRP		2.5	0.1	83.888	0.4465			
				0.2	85.00	0.4469		
		3.0	0.1	88.00	0.4470			
				102.704	0.4479			

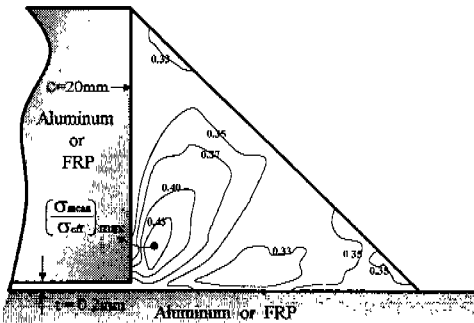
이상의 결과를 종합하면 접착부 내의 임의의 점에서 $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ 이 접착제의 재료물성치가 되는 일정한 값 ($[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{failure}$) 에 도달하면 파괴에 이른다는 파손 기준을 세울 수가 있다.



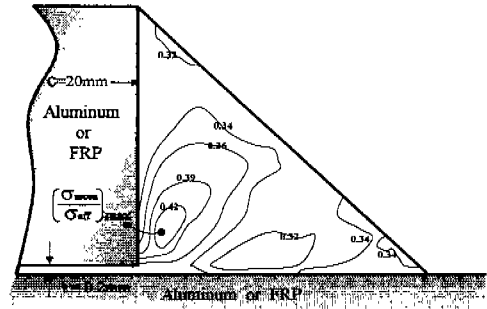
(a) Adhesive : DMS2169 , fillet=100%



(b) Adhesive: DMS2169 , fillet=0%



(c) Adhesive : DP460 , fillet=100%



(d) Adhesive : Araldite 1515 , fillet=100%

Fig.6 $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ distribution in adhesive region of single-lap joints with different design parameters at failure load

Table 5 Maximum value of $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ for various design parameters in single-lap joint (Adhesive:DMS2169,fillet=100%)

Adhesive	Adherent	c (mm)	t (mm)	Failure strength (N/mm)	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$
DMS 2169	Al + Al	7.62	0.0254	465.4	0.4028	0.4024 deviation : 0.00049
		12.7	0.0254	678	0.4028	
			0.0762	658	0.4034	
		25.4	0.127	608	0.4027	
	0.127		608	0.4027		
	Al + FRP	7.62	0.0254	376	0.4024	
		12.7	0.0254	496	0.4019	
			0.0762	476	0.4014	
		0.127	444	0.4021		
	FRP + FRP	7.62	0.0254	334	0.4025	
		12.7	0.0254	414	0.4028	
			0.0762	390	0.4022	
0.127		310	0.4018			
25.4	0.0254	588	0.4019			

Table 6 Maximum value of $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ for various design parameters in single-lap joint (Adherend : DMS 2169, fillet=0%)

Adhesive	Adherend	c (mm)	t (mm)	Failure strength (N/mm)	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$
DMS 2169	Al + Al	7.62	0.0254	334	0.4028	0.4035 deviation : 0.0010
				480	0.4044	
		12.7	0.0762	436	0.4023	
				382	0.4033	
	25.4	0.0254	588	0.4050		
	Al + FRP	7.62	0.0254	239	0.4029	
				317	0.4037	
		12.7	0.0762	280	0.4020	
				236	0.4029	
	25.4	0.0254	409	0.4048		
	FRP + FRP	7.62	0.0254	210	0.4025	
				253	0.4032	
		12.7	0.0762	220	0.4028	
				158	0.4055	
	25.4	0.0254	386	0.4038		

Table 7 Maximum value of $\sigma_{mean}/\sigma_{eff}$ for various adherends in single-lap joint (Adhesive : DP460, Araldite2015, fillet=100%)

Adhesive	Adherend	c (mm)	t (mm)	Failure strength (N/mm)	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$	$[\frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{eff}}]_{max}$
DP 460	Al + Al	20	0.2	632	0.4493	0.4483 deviation : 0.0008
	Al + FRP			516	0.4484	
	FRP+ FRP			343	0.4473	
Araldite 2015	Al + Al	20	0.2	552	0.4340	0.4346 deviation : 0.0007
	Al + FRP			426	0.4356	
	FRP+ FRP			284	0.4342	

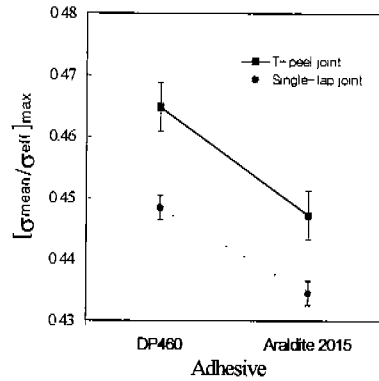


Fig.7 Difference of $[\sigma_{mean}/\sigma_{eff}]_{max}$ for different joint style and adhesives

5. 결론

연성을 나타내는 접착제로 접착이음을 한 경우에 대한 접착 파괴 강도를 예측하기 위한 연구에서 접합부의 형상이나 피접착재의 재료에 상관없이 같은 변형 모드에서는 접착부 임의 위치에서 Von-Mises 응력에 대한 평균 응력의 비의 최대값이 일정 값에 도달하면 파괴 된다는 새로운 파괴 기준을 수립하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. R. Rice and D. M. Tracey, "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields", Journal of Mechanical Physics Solids, Vol. 17, pp. 201-207, 1969.

2. A. L. Gurson, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth : Part I -4 Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15, 1977.
3. P. F. Thomason, *Ductile Fracture of Metals*, Pergamon Press, 1990.
4. A. S. Argon, J. Im and R. Saforglu, *Metallurgical Transactions*, 6A, pp. 825, 1975.
5. M. A. Sutton, W. Zhao, M. L. Boone, A. P. Reynolds and D. S. Dawicke, "Prediction of Crack Growth Direction for Mode I/II Loading Using Small-scale Yielding and Void Initiation/growth Concepts", *International Journal of Fracture*, Vol. 83, pp. 275-290, 1997.
6. ASTM D 638, *Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics*.
7. SAE J1863, *Coach Joint Fracture Test*.
8. ASTM D 1002-72, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading(Metal-to metal)", (Reapproved 1983)
9. ASTM D 3165-73 "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Laminated Assemblies", (Reapproved 1979).
10. ASTM B 209-95, *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*.
11. E. A. Brandes, *Smithells Metals Reference Book*, sixth edition, Butterworth & Co. Ltd, 1983.
12. Douglas Aircraft Co., *Fiber Reinforced Epoxy Prepreg, 250°F Cure, DMS 2288, DAC*, 1988.
13. Hankuk Fiber Glass Co., *Hankuk Fiber Process Control Specification, HPS-1222, HFG*, 1990.