

자동차 부품용 강재(SM40C)의 마찰용접 최적화와 AE에 의한 실시간 품질평가에 관한 연구

오세규* · 박종배** · 공유식***
(99년 1월 7일 접수)

A Study on Optimization of Friction Welding of Automobile Component
Materials(SM40C) and Its Real Time Quality Evaluation by AE

Sae-Kyoo Oh* · Jong-Bae Park** · You-Sik Kong***

Key Words : Friction Welding(FRW, 마찰용접), Acoustic Emission(AE, 음향방출), Welding
Condition(용접조건), Weld Strength(용접강도), Toughness(인성), Quality(품질),
Optimization(최적화), Real Time Evaluation(실시간 평가)

Abstract

This paper presents the experimental examinations and statistical quantitative analysis of the correlation between the cumulative counts of acoustic emission(AE) during plastic deformation periods of the welding and the tensile strength and other properties of the bar-to-bar welded joints of O.D. 16mm shaft(SM40C) as well as the various welding variables. And this is a new approach which attempts finally to develop real-time quality monitoring system for friction welding. The results lead to a practical possibility of real-time quality control more than 100% joint efficiency showing good weld with no micro structural defects.

1. 서 론

마찰용접은 압접특성 및 경제성이 우수하여 각
종 산업기계부품, 자동차부품, 선박용부품, 공작기

계부품, 항공기 엔진부품등 여러 분야에서 이용되
고 있다¹⁻³⁾. 특히 자동차 크랭크 축은 큰 하중을
받으면서 고속회전 하기 때문에 강성이 충분하고 내
마모성이 커야하며 동적·정적 밸런스가 원활해야

* 종신회원, 부경대학교 공과대학

** 정회원, 한독부산직업전문학교

*** 정회원, 부경대학교 대학원

하므로 마찰용접에 의한 제품을 생산하면 재료비, 제작시간의 절감등으로 저비용, 고품질의 생산이 가능하며, 이중재의 재료를 간단히 접합할 수 있는 것이 큰 장점으로서 기능부품의 설계에도 많은 자유도를 기대할 수 있다.

본 연구는 연속구동 브레이크형 마찰용접기(TOHO TH-25)를 사용하여 자동차 핵심 부품인 크랭크 축등 여러 가지 축류(SM40C)의 제작에 있어 마찰용접법을 적용하였다. 기계구조용탄소강 SM40C(ϕ 16mm) 동종 강재의 마찰용접 이음부의 강도시험, 인장시험, 파단면의 SEM(scanning electron micrograph)검사를 병행하였고, 경도분포와 미시조직 검사를 수행하였다. 그리고 용접이음 효율이 100% 이상이 되는 강도와 인성을 고려한 최적용접조건의 범위를 설정하였고, 마찰용접 변수와 그 상관 관계를 규명하여 자동차 축류의 설계 및 제작을 위한 최적화 용접조건을 구하였다⁴⁾.

또한, 마찰용접시 비파괴평가(NDE, nondestructive evaluation) 방법의 하나인 음향방출시험(AE, acoustic emission)을 수행하였다^{5~7)}. 즉, 연속적 감시가 가능한 AE의 이점을 이용하여 AE의 누적 총량과 마찰용접변수 및 용접품질(강도와 인성)을 실시간(real time)에 평가할 수 있는 기술개발에 적용할 자료가 될수 있도록 하였다^{8,9)}.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 일반적으로 시판되는 기계구조용 탄소강재 ϕ 21 SM40C강으로서 자동차부품용 강재가 가져야 할 내마모성과 인성에 중점을 두었다. 본 연구에 사용된 SM40C강의 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

인장 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of SM40C steels (wt.%)

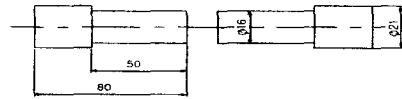
Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Fe
SM40C	0.393	0.163	0.729	0.010	0.008	0.135	0.030	bal.

Table 2 Mechanical properties of SM40C steels

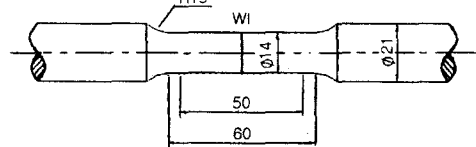
Properties	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Reduction of area	Tensile energy of absorption	Hardness Hv
	σ_t	σ_y	ϵ (%)	Ψ (%)	Ea	
Material	(Mpa)	(Mpa)			($kN \cdot mm/mm^2$)	
SM40C*	583	390	34.2	57.5	9.28	176~178

* Heat treatment temp. : Quenching = 830~880°C, Tempering = 550~650°C

Q=quenching, T=tempering



(a) Friction welding and AE test specimen of ϕ 16 bar-to-bar



(b) Tension test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

2.2 실험방법

마찰용접시험에 사용된 마찰용접기는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이고, AE시험에 사용된 시험기는 AE testing system (LOCAN 320, 16 channel)이며, 용접계면과 AE 센서와의 거리는 315mm, gain 35dB, threshold 40dB이며, sensor는 R15를 사용하였다. 그리고, 이음부의 인장강도 시험에 사용된 만능시험기(UTM 25T)로서, 인장속도는 2mm/min으로, 모재와 용접재를 Fig. 1(b)와 같은 형상치수로 인장 시험편을 선반 가공한 후 연삭가공하여 인장시험을 수행하였다.

마찰용접의 최적화 실험을 위해서 우선 ϕ 16mm 봉대봉(bar-to-bar)마찰용접 최적조건의 최적화를 시도하여야 한다. 즉, 문헌^{1~3)}을 조사하여 회전수(n)를 결정후 가열압력(P_1), 가압압력(P_2)을 결정

하고 여러번 실험을 반복 하여서 P_1 , P_2 를 선정한 후, 가압시간(t_2)을 선택하고 그 후 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험한다. 이음부의 강도는 인장강도를 구하여 모재보다 우수한 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1)을 결정 짓는다. 그리고, 용접 시간 중에 나타나는 AE발생 거동을 해석하기 위해서는 용접시작부터 용접완료까지 검출된 AE 누적 총량과 용접강도와와의 상관성을 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접변수와 용접품질간의 상관관계

본 실험에서 사용된 마찰용접의 변수로는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 마찰단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 마찰단조가압시간(t_2) 등이며, 여기서는 P_1 , P_2 를 결정한 후 마찰가열시간 t_1 (sec)을 여러 가지로 변화시켰다. Table 3은 $\phi 16$ 봉대봉 동종재 마찰용접의 조건을 나타낸 것이다.

Fig. 2는 최적 P_1 , P_2 의 범위를 인장시험을 통해 구한 것이며, P_1 , P_2 가 60, 120MPa에서 가장 높은 인장강도 값을 나타내는데, 이때 인장강도는 620MPa 이었다. 그리고, 파단위치는 용접계면에서 20~25mm 떨어진 모재부로서 전형적인 컵·콘(cup & cone)형의 파단 이었다.

Table 3 Welding conditions for similar friction welding(FRW) of SM40C ($\phi 16$)

Case	Rotation n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)	Total upset U_T (mm)
1	2,000	40	80	5	5	5.4
	"	50	100	"	"	6.9
	"	60	120	"	"	8.9
	"	70	140	"	"	10.9
2	2,000	60	120	0.5~8	5	2.1~16.1

Fig. 3은 Table 3 (Case 2)과 같은 조건에서 시간 조정법으로 용접한 $\phi 16$ 봉대봉과 SM40C 동종재 마찰용접재의 인장강도 σ_t 와 가열시간 t_1 의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이

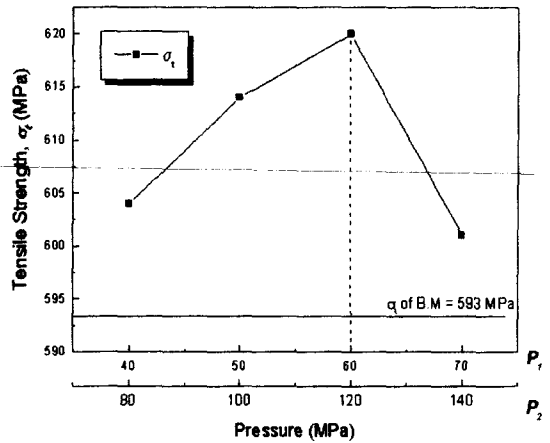


Fig. 2 σ_t vs. P_1 , P_2 in similar FRW of SM40C according to increasing heating and forging pressures
Welding condition : those of Table 3 (Case 1)

OtZ(optimum t_1 zone)는 $t_1=2\sim 5$ sec이며 이때의 인장강도는 $\sigma_t=620\sim 617.5$ MPa를 나타내고 있다. 이것은 모재의 인장강도 593 MPa 보다 모두 상회하는 구간이다(이음효율 104~105%). 이때 σ_t 와 t_1 의 상관실험식은 다음과 같이 계산되었다. 즉,

$$\sigma_t = 0.82 t_1^3 - 12.30 t_1^2 + 53.14 t_1 + 557.2 \quad (R^2 = 0.98) \quad (1)$$

이다. 이때 R^2 은 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 1(100%)에 가까우므로 실험식의 신뢰성이 매우 높다⁴⁻⁶⁾.

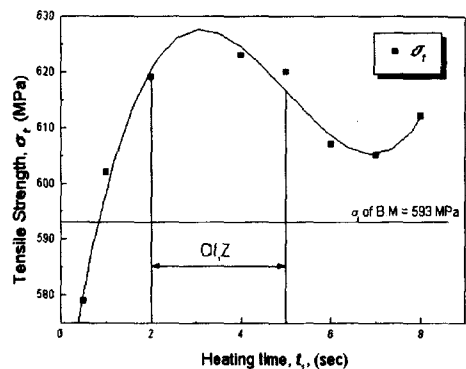


Fig. 3 σ_t vs. t_1 of bar to bar($\phi 16$) similar FRW joints of SM40C
Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

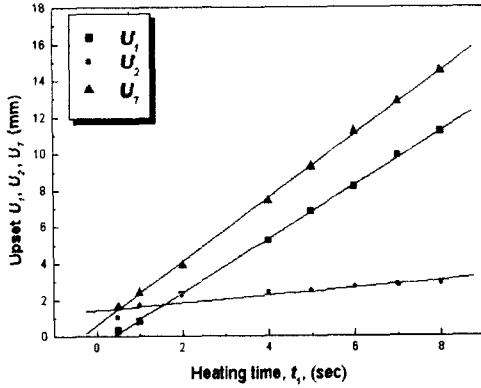


Fig. 4 U_1, U_2, U_T vs. t_1 for $\phi 16$ similar FRW of SM40C
Welding condition : those of Table 3

Fig. 4는 $\phi 16$ mm 동종재 마찰용접에서 마찰가열 업셋량 U_1 (mm), 마찰단조업셋량 U_2 및 총업셋량 U_T (mm)와 가열시간 t_1 (sec) 간의 상관관계를 실험에 의해 구한 결과이다.

U_1, U_2 및 U_T 는 가열시간 t_1 (sec) 안에서 직선적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이때 $U_1-t_1, U_2-t_1, U_T-t_1$ 의 실험식은 다음과 같다. 즉,

$$\begin{aligned} U_1 &= 1.48t_1 - 0.6 \quad (R^2=0.99) \\ U_2 &= 0.21t_1 + 1.4 \quad (R^2=0.92) \\ U_T &= 1.74t_1 + 0.6 \quad (R^2=0.99) \end{aligned} \quad (2)$$

이다.

Fig. 4와 식(2)에 의하여 Fig. 3에서 구한 최적 $t_1=2\sim 5$ 초에 대한 U_1, U_2 및 U_T 를 구할 수 있으므로 최적 마찰용접을 시간조정법대신 업셋조정법으로도 활용할 수 있음을 알 수 있다⁶⁾.

Fig. 5는 마찰용접부의 인성에 미치는 t_1 의 영향을 조사하기 위한 것으로서 마찰가열시간 t_1 의 변화에 따른 단위면적당 인장흡수에너지 E_a ($\text{kN} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$)와 연신율 ϵ (%)의 상관관계를 실험에 의해 구한 결과이다.

Fig. 5에서 파단부가 모재부이므로 모재부의 단위면적당 인장흡수에너지와 연신율에는 약간 미치지 못하나, 마찰가열시간이 증가함에 따라 감소하는 추세이다. 이는 가열시간에 따라 HAZ부의 증가에 따라 나타나는 현상이라 생각된다.

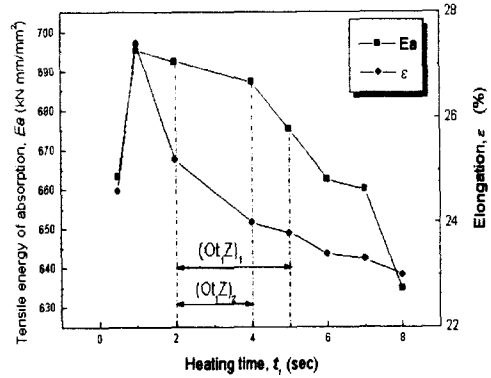


Fig. 5 E_a vs. t_1, ϵ vs. t_1 of FRW joints of SM40C $\phi 16$
Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

Fig. 3에서 구한 $O_{t_1}Z(2\sim 5 \text{ sec})$ 에서의 E_a 와 ϵ 은 $t_1 = 5 \text{ sec}$ 에서 E_a 가 급격히 낮아지므로, 인성면에서 최적가열시간을 $(O_{t_1}Z)_1 = 2\sim 5 \text{ sec}$ 에서 $(O_{t_1}Z)_2 = 2\sim 4 \text{ sec}$ 로 수정함이 더욱 안전하다.

3.2 용접변수와 AE총량 및 용접품질과의 상관관계

Fig. 6은 Table 3(Case 2)와 같은 용접조건하에서 SM40C 시험편으로 마찰용접과 동시에 AE 시험을 수행한 결과를 나타내었다. $\phi 16$ mm 봉대봉의 용접에서 Fig. 3과 Fig. 5에서 구한 $O_{t_1}Z$ 가 2-4sec 일 때, AE 누적총량은 $ONZ=18380\sim 35696$ counts이며, 또한 상관식을 최소자승법에 의해 다음과 같이 구하였다.

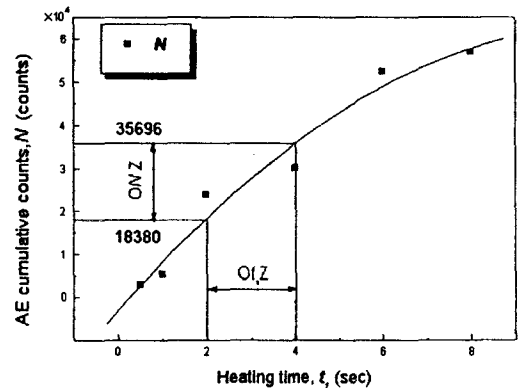


Fig. 6 N vs. t_1 of bar to bar FRW of SM40C ($\phi 16$)
Welding condition : those of Table 3 (Case 2)

$$N = -524.01t_1^2 + 11800.72t_1 - 3122 \quad (R^2 = 0.98) \quad (3)$$

Fig. 7은 Table 3 (Case 2)과 같은 용접조건하에서 동종재 SM40C(φ16)의 마찰용접시 AE 시험을 수행한 결과 AE 누적총량 N(counts)과 용접품질(인장강도) σ_t (MPa)와의 상관관계를 실험적으로 구한 결과이다. 여기서 Fig. 6에서 구한 최적 AE 누적총량 ONZ가 18380~35696 counts이면 용접품질이 가장 우수하며 이음효율이 100% 이상이다. 이때 σ_t -N 관계 실험식은 다음과 같이 전산화되었다.

$$\sigma_t = 9.18 \times 10^{-13}N^3 - 1.18 \times 10^{-7}N^2 + 4.36 \times 10^{-3}N + 573.6 \quad (R^2 = 0.88) \quad (4)$$

이다.

따라서, 용접실시간에 발생한 AE총량을 측정하여, 이 AE총량이 최적범위 ONZ에 속하는지 여부를 확인하므로써 마찰용접 강도면에서 이음효율이 100%이상이 되고, 그 인성도 만족할 만한 것임을 평가할 수 있는, AE에 의한 마찰용접품질의 실시간 평가 가능성이 본 연구의 자동차 크랭크축의 동종재 마찰용접 최적화와 그 품질평가에서 입증되었고, 앞으로 이의 실용화 연구가 기대될 수 있다.

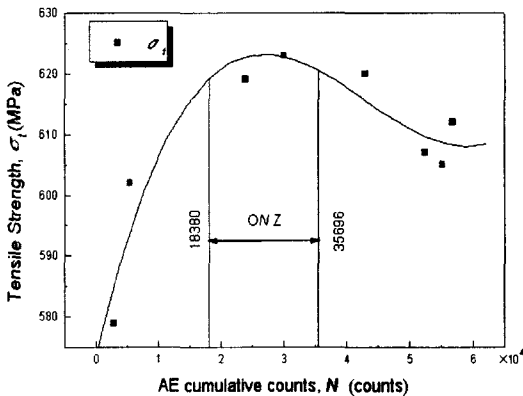


Fig. 7 σ_t vs. N in FRW of SM40C ($\phi 16$)
Welding conditions : those of Table 3 (Case 2)

3.3 용접부의 경도분포

Fig. 8은 적정 마찰용접 조건에서 용접한 SM40C 동종재 용접부의 경도분포를 조사한 것으로서 미소 비커스경도(micro Vickers hardness)를 0.5mm 간격

으로 용접부에서부터 열영향부, 모재부 근처까지 측정된 결과를 보여준다. 대부분의 재료의 경우와 마찬가지로 SM40C의 경우도 마찰용접면을 중심으로 열영향부에서 높은 경도가 나타나며 마찰용접면에서 멀어질 수록 모재의 경도값과 근사하게 되고 있다⁶⁾.

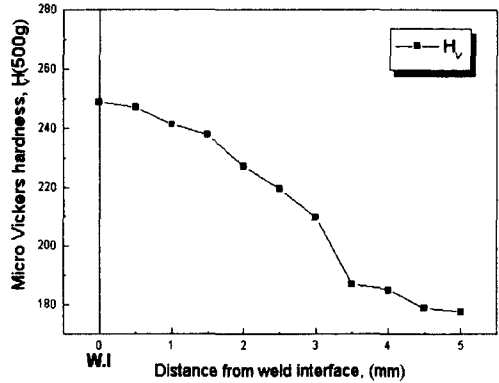


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface(W.I) of friction welded joints of SM40C bar to bar ($\phi 16$)
Welding conditions : $n = 2,000$ rpm, $P_1 = 60$ MPa, $P_2 = 120$ MPa, $t_1 = 4$ sec, $t_2 = 5$ sec, $U_T = 8.9$ mm

3.4 용접부 인장파단면의 SEM 검사

최적조건에서 용접된 경우의 인장파단면의 SEM

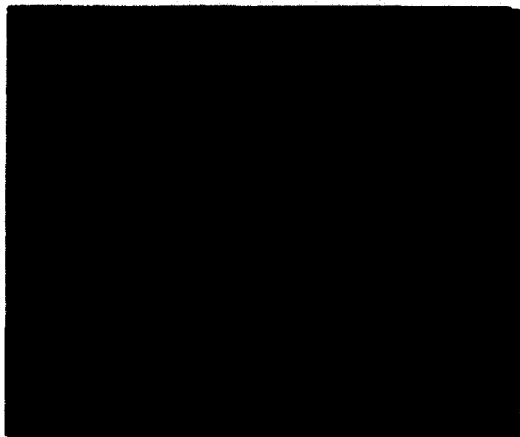


Fig. 9 Fractograph of tensile fracture of friction welded joint of SM40C under optimum welding condition by SEM($\times 200$)
Welding conditions : $n = 2,000$ rpm, $P_1 = 60$ MPa, $P_2 = 120$ MPa, $t_1 = 4$ sec, $t_2 = 5$ sec, $U_T = 8.9$ mm

사진을 Fig. 9에서 보여주고 있다. 이 그림은 연성 파괴의 흔적과 취성파괴의 양상을 보여주고 있는 의사벽개 파단양상을 나타내고 있다.

4. 결 론

자동차 부품용 강재 SM40C($\phi 16$)의 동종재 마찰 용접기술과 AE 실시간 평가법의 개발을 위하여 동종재 마찰용접 최적화와 AE평가에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) SM40C 동종재 봉대봉의 압접을 위하여 마찰 용접법 적용이 가능하였다.
- 2) 모든 시험편이 모재부에서 인장파단 되었고, 최적용접조건에서의 용접부 이음효율이 거의 100% 이상이 되었으며, 용접강도, 인성을 고려한 최적용접조건은 다음과 같다.
 $n=2,000$ rpm, $P_1=60$ MPa, $P_2=120$ MPa, $t_2=5$ sec일 때, $t_1=2\sim 4$ sec
- 3) 봉대봉($\phi 16$)의 동종재 마찰용접 품질(인장강도, 인성)을 분석하였고 이에 따른 용접조건(가열 시간 t_1 , h)과 용접품질(인장강도, σ_t , MPa)과의 상관실험식을 다음과 같이 도출하였다. 즉,
 $\sigma_t = 0.82 t_1^3 - 12.30 t_1^2 + 53.14 t_1 + 557.2$ 이다.
- 4) 용접실시간에 측정된 AE총량의 최적범위 ONZ에서 마찰용접 이음효율이 100%가 되는 용접품질(인장강도, 인성)을 얻을 수 있었고, 실제 마찰용접시 AE를 측정함으로써 실시간에 용접품질의 평가가 가능함을 알 수 있었다. 이때 AE총량(N , counts)과 용접부 인장강도(σ_t , MPa)와의 상관식은 다음과 같이 도출되었다. 즉,
 $\sigma_t = 9.18 \times 10^{-13} N^3 - 1.18 \times 10^{-7} N^2 + 4.36 \times 10^{-3} N + 573.6$ 이다.

참 고 문 헌

- 1) American Welding Society, "Welding Handbook",

- Vol. 2. p. 747, pp. 672-763, 1991
- 2) 摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", コロナ社, p. 46, pp. 145-150, 184, 1976
- 3) 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會 20年誌", pp. 1-106, 1984
- 4) S. K. Oh and K. K. Wang, "Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic Emission in Friction Weld", J. of Korea Soc. of Marine Engineers. 7(1), pp. 22-33, 1983
- 5) S. K. Oh, K. K. Wang and G. R. Reif, "In-process Quality Detection of Friction Welds using Acoustic Emission Techniques", Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention in Kansas, USA, Tech. Sess. 5, Apr.: Welding Journal of American Welding Society, Welding Research Supplement, Vol. 61, No. 9, pp. 312-316, 1982
- 6) S. K. Oh, "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques", Ph.D Thesis, Graduate School, Keio Univ, Japan, pp. 1-314, 1982
- 7) S. K. Oh, "Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission", Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.7. No.2. pp. 226-236, 1983
- 8) 오세규, "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한 기계학회지, 제 22권, 제 3호, pp. 184-190, 202, 1982
- 9) S. K. Oh, "Friction Weld Strength Analysis by Acoustic Emission Techniques", J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.22. No.3. pp. 184-190, 1982