

플라즈마용사 TiO₂ 코팅 강재의 음향방출 특성

김 귀 식* · 박 경 석** · 홍 용 의***

Acoustic Emission Characteristic of TiO₂ Coated Steel by Plasma Thermal Spray

Gui-Shik Kim*, Gyeong-Suk Park** and Yong-Ui Hong***

ABSTRACT

In this paper, adhesiveness of plasma thermal sprayed coating steels is investigated through AE(acoustic emission) in loading a tensile. AE parameters used are event, count, energy and peak amplitude. The powders used for the coating are nickel aluminum composite powder Ni-4.5wt.%Al (BOND) and titanium dioxide powder TiO₂ (TOP). Test specimens are BOND, TOP and BT(BOND+TOP) that are sprayed on carbon steel(S45C) by plasma thermal spray. In the tensile testing, the process and occurrence of the exfoliation of the sprayed coating layer can be estimated by AE. Characteristics of AE parameters, such as event, count, amplitude and energy, on the layer exfoliation have all the similar aspects. The exfoliation of BOND specimen occurs from 16% tensile strain to fracture point, TOP specimen does from 1% to 5%, and BT specimen does from 6% to 11%.

Key words : Ceramic coating, plasma thermal spray, adhesiveness strength, acoustic emission

1. 서 론

최근 산업의 발달로 고온, 마모, 내식성 등에 복합적인 가혹한 환경하에서 사용되는 산업기계류가 증가하면서 재료의 표면에 사용 환경에 적합한 우수한 기능을 부여하는 표면개질기술이 널리 이용되고 있다.

플라즈마 용사방법은 표면개질의 한 방법으로 금속, 세라믹, 플라스틱 등 용융 가능한 거의 모든 재료에 적용이 가능하며, 세라믹의 뛰어난 열적, 기계적 특성으로 인해 내열성, 내마모성 및 내식성 등의 기능이 필요한 기계구조물에 널리 사용되고 있다¹⁾. 그러나 세라믹 용사재는 소재와 코팅층 사이의 낮은 결합력 과, 용사과정에서 형성되는 기공 등의 결함이 큰 결점으로 작용하여 실용화에 문제점으로 지적되고 있다²⁾. 이러한 결함의 측정은 주로 파괴검사법으로 행하여져 왔으나, 최근에는 재료 내부의 미소한 변형이나 손상을 연속적으로 검출할 수 있는 AE(Acoustic Emission)법에 의한 평가기술이 주목받고 있다³⁾.

* 제주대학교 기계공학과, 산업기술연구소
Dept. of Mechanical Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.
** 제주지방중소기업청
Regional Office of Cheju SMBA
*** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

따라서 본 연구에서는 세라믹 용사 코팅제의 파괴 특성을 AE법에 의하여 평가할 수 있는 기준을 마련하기 위하여, 탄소강 S45C를 기재(substrate)로 하여 본드 코팅제로서 금속계 분말 Ni-4.5wt.%Al과 산화물계 세라믹 분말 TiO₂를 플라즈마 용사법에 의해 코팅하여, 용사피막에 대하여 인장하중 부가시 발생하는 AE특성을 파괴거동과 비교하여 검토하였다.

II. 재료 및 방법

2.1 시험편

실험에 사용된 시험편의 기재로는 탄소강(S45C)을 사용하였으며, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타났다. 코팅에 앞서 전 처리로서 Table 1의 조건으로 기재의 표면에 블라스팅(blasting)을 실시한 후, 초음파 세척을 약 15분 동안 실시하였다.

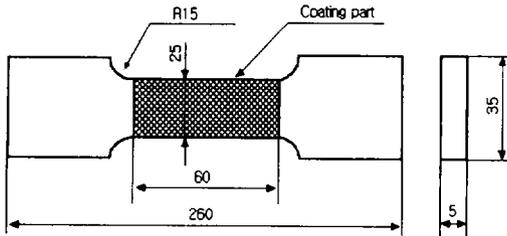


Fig. 1 The shape and dimension of test specimen(unit: mm)

Table 1 Blasting conditions

Material composition	Powder size (μm)	Air pressure (kg/cm ²)	Distance (mm)
White alumina	15~53	5.5	50~100

코팅은 기재의 표면을 블라스팅 한 후, 플라즈마 용사장치(Metco Inc.)를 이용하여 Table 2의 조건으로 실시하였으며, 아래에 나타난 3종류의 시험편을 제작하였다. 코팅에 사용된 재료는 탑 코팅 재료로 세라믹(TiO₂)을, 본드 코팅 재료로 합금 분말(Ni-4.5wt.%Al)을 사용하였으며, 그 특성을 Table 3에 나타냈다.

Table 2 Plasma spraying conditions

Condition Powder	Powder feed unit		Plasma gas (psi)		DC (A)	DC (V)	Spray dis. (mm)
	Flow rate (ft ³ /h)	Feed rate (g/min)	Ar	H ₂			
TiO ₂	13.5	53	80	15	500	65~70	75~100
Ni-4.5wt.%Al	13.5	68	80	15	500	65~70	100~150

Table 3 Powder conditions

Condition Powder	Typical composition	Typical size range(μm)	Melting point
Ni-4.5wt.%Al	Aluminum 4.5% Nickel balance	45 ~ 90	660°C
TiO ₂	Titanium dioxide 99% minimum	8 ~ 88	1920°C

- BOND : S45C에 본드(NI-4.5wt.%Al)코팅한 시험편
- TOP : S45C에 세라믹(TiO₂)코팅한 시험편
- BT : BOND시험편 위에 세라믹 코팅한 시험편

2.2 실험장치 및 방법

플라즈마 용사 코팅제의 AE특성을 조사하기 위하여 인장시험과 AE신호 측정은 동시에 실시하였다. 시험은 만능재료시험기(Zwick Co.)를 이용하였으며, 표점거리 50mm, 크로스헤드 이송속도 1mm/min로 인장력을 가하면서, MITRAS 2001 (Physical Acoustic Co.)를 사용하여 AE신호를 측정하였다. 측정시 검출된 AE신호는 10kHz~2MHz의 Band pass filter를 사용하여 40dB로 증폭하였다. Fig. 2는 돌발형 AE신호로서 본 연구에 사용된 AE 파라메타를 정의한 것이다. AE 파라메타는 계수(Count), 진폭(Peak Amplitude), 사상수(Event) 및 에너지(Energy)등을 이용하여 정리하였다. 또한, AE센서와 고정용 지그와의 밀착은 고탄성 스폰지가 내재되어 있는 자석고정식 홀더로 일정한 압력으로 누르고, AE센서와 시험편과의 접촉은 고진공 Silicon을 발라 밀착성을 증가시켰다.

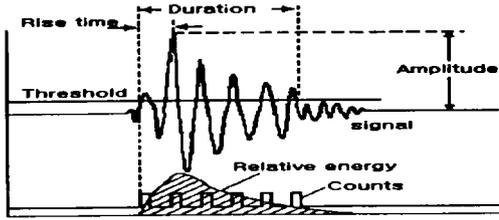


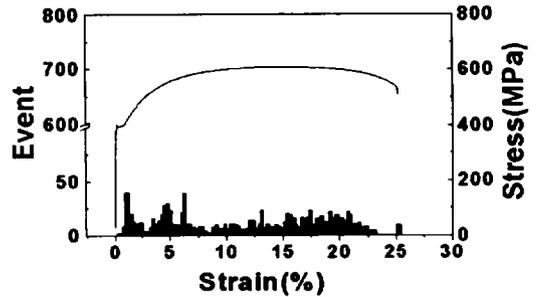
Fig. 2 Schematic AE signals corresponding to one AE event

III. 실험결과 및 고찰

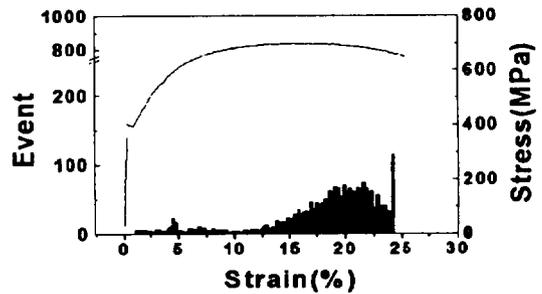
3.1. 용사 코팅재의 AE 발생거동

Fig. 3에 SUB시험편, BOND시험편, TOP시험편 및 BT시험편의 AE 사상수와 응력-변형을 곡선과의 관계를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 응력-변형을 곡선은 거의 동일하게 나타나고 있어 용사열에 의한 기재의 변형이 없음을 나타낸다. 또한 음향방출은 용사피막의 유무 및 코팅재의 종류에 관계없이 전 영역에서 발생하고 BT시험편, TOP 시험편, BOND시험편, SUB시험편 순으로 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 용사피막을 가진 코팅재가 SUB시험편에 비해 활발한 음향방출이 일어나는 것은 SUB시험편에는 없는 음향방출원 즉, 용사피막 내에서 박리의 생성, 성장 및 탈락 등에 의해 SUB시험편과는 다른 양상의 음향방출이 일어난다고 추정할 수 있다.

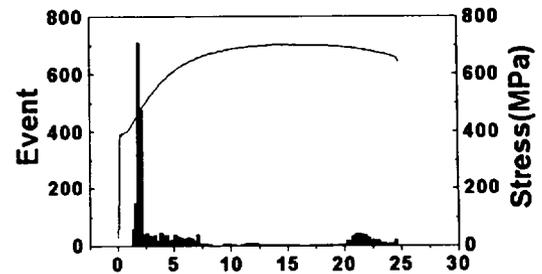
Fig. 3에서 AE 사상수 특성을 살펴보면 SUB시험편의 경우 응력-변형율의 증가에도 불구하고 용사 코팅재에 비해 작고 전 구간에서 비교적 일정하게 발생하고 있으나, BOND시험편의 경우 시험초기 SUB시험편과 비슷한 양상으로 발생하다가 변형율 15%를 전후로 증가하여 파단에 이르고 있음을 알 수 있다. 또한 TOP시험편의 경우 기재가 항복변형을 일으키는 구간 즉, 변형율 1%를 전후하여 급격히 증가하고 응력-변형율이 증가함에 따라 SUB시험편과 비슷한 양상의 AE 사상수가 발생하고, BT시험편의 AE 사상수는 변형율 6%~11%사이의 구간에서 급격히 증가하고 이후의 구간에서 BOND시험편과 비슷한 양상으로 발생하고 있어 코팅재의 종류에 따라 음향방



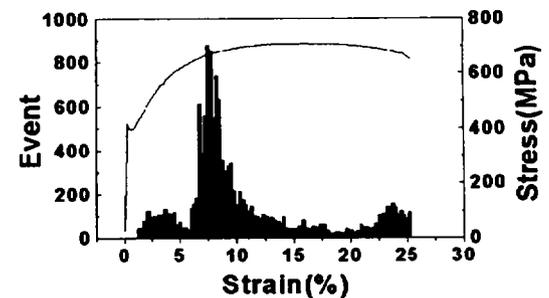
(a) SUB



(b) BOND



(c) TOP



(d) BT

Fig. 3 Stress and event vs. strain

출 특성이 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 용사피막을 가진 시험편의 경우 AE 사상수가 급격히 증가하는 구간에서 기재(S45C)와 용사피막의 열팽창계수 차이로 많은 에너지가 축적되어 기재와 용사피막 혹은 용사피막 내에서 박리가 일어난다고 판단된다.

Fig. 4에 AE 계수 및 에너지 특성을 응력-변형률 선도와 함께 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 AE 계수 및 에너지 특성은 전술한 AE 사상수 특성과 마찬가지로 용사피막의 박리가 발생하는 구간에서 급격히 증가하며, 코팅재에 인장력이 작용시 그 에너지는 AE 사상수가 SUB시험편에 비해 급격히 증가하는 구간에서 기재와 용사피막에 축적되고, 축적된 에너지가 기재와 용사피막의 축적한계를 넘어서면 에너지가 방출한다. 결과적으로 기재와 용사피막 혹은 용사 피막 내에서 박리의 발생, 성장 및 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있으며, AE 계수 및 에너지의 총량은 SUB시험편, BOND시험편, TOP시험편 및 BT 시험편의 순으로 높게 나타나고 있다.

한편, BT시험편의 경우 기재(S45C) 위에 직접 세라믹(TiO₂)코팅한 TOP시험편에 비해 늦게 박리가 진행되고 있어 본드((NI-4.5wt.%Al)코팅 효과에 의해 밀착성이 개선되었음을 알 수 있다.

3.2. 용사 코팅층의 표면 관찰 및 파괴기구

AE 진폭과 응력-변형률과의 관계를 Fig. 5에, 인장 시험 후 파단부의 사진을 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Fig. 5에서 진폭 값은 문턱값을 45dB로 설정하였으므로 문턱값 이상의 신호만이 나타나 있다. 여기에서 AE 진폭 특성은 전술한 AE 사상수, 계수 및 에너지 특성과 비슷하게 박리가 발생하는 구간에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, SUB시험편의 경우 대부분 약 65dB 이하의 AE 진폭이 발생하고 있으나, BOND시험편의 경우 기재와 용사피막사이의 박리로 추정되는 구간 즉, 변형률이 약 15%에서 파단점까지의 구간에서 SUB시험편 보다 조금 높은 80dB이하의 진폭을 가진 음향방출이 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 구간에서의 SUB시험편과 비슷한 진폭을 갖는 음향방출의 증가는 본드 코팅층 내부에서의 소성변형과 파괴에 의해 발생한 것이고,

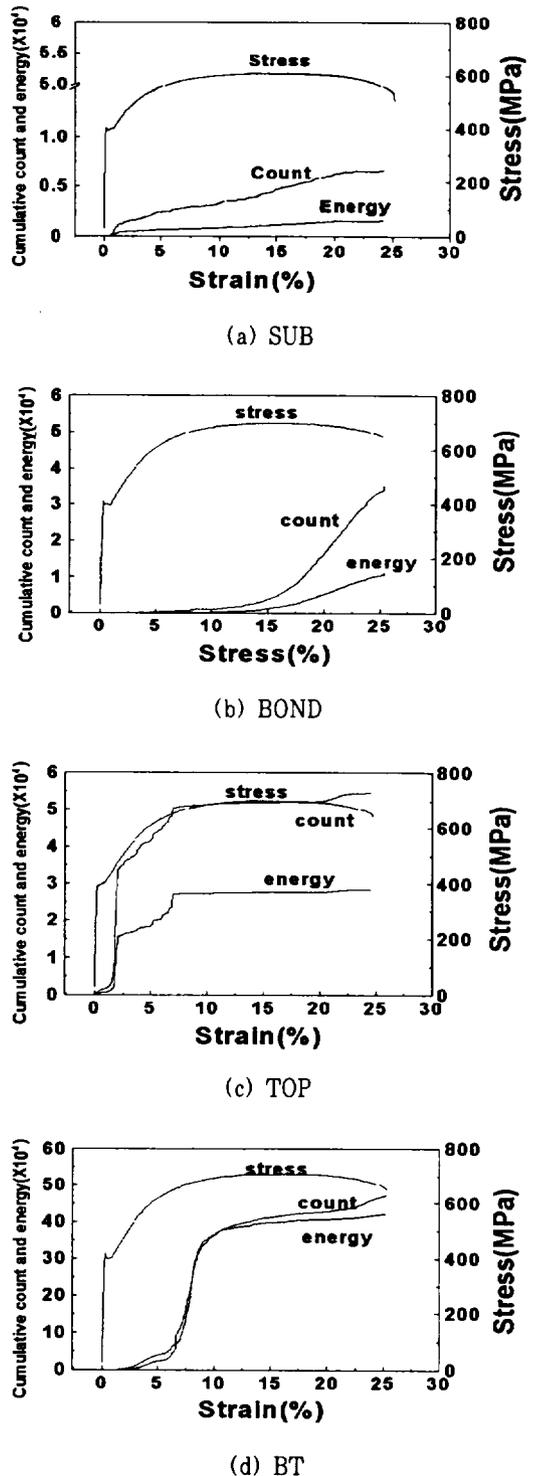


Fig. 4 Cumulative energy vs. strain

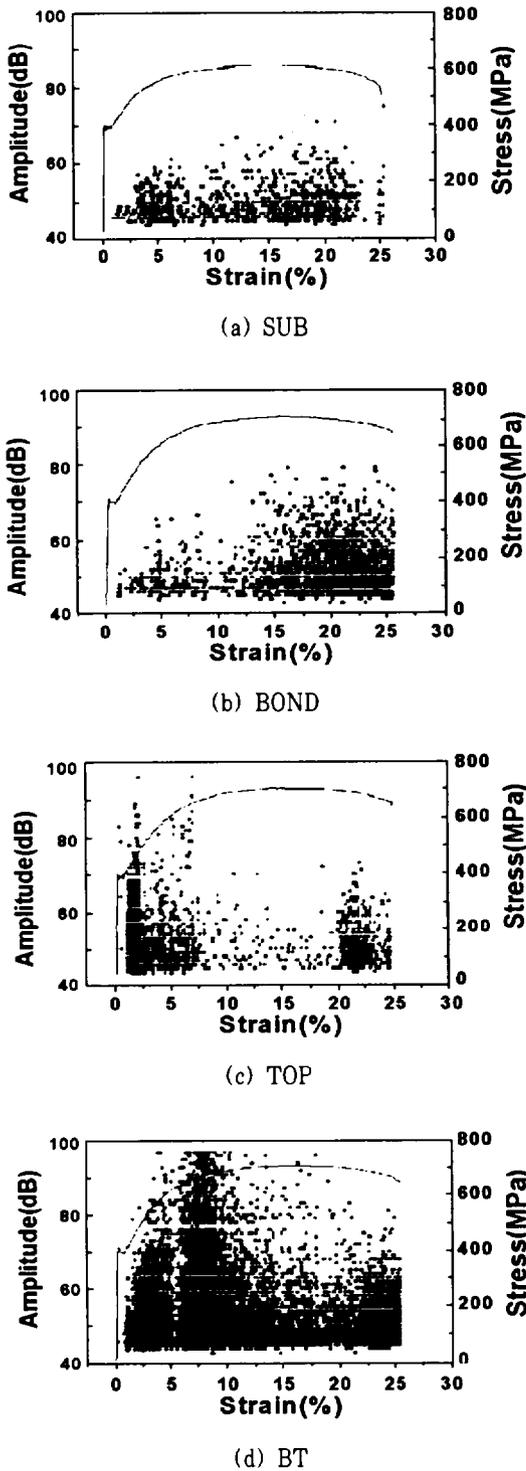
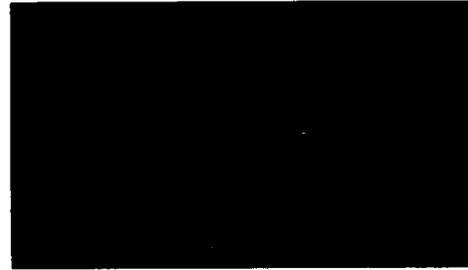
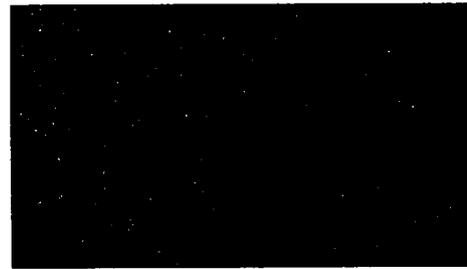


Fig. 5 Stress and amplitude vs. strain



(a) BOND



(b) BT

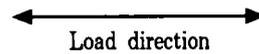


Fig. 6 Surface cracks of coating layer

SUB시험편 보다 높은 진폭을 갖는 음향방출은 기재와의 열팽창계수의 차이로 변형율의 증가에 따라 코팅층에 축적되어 있던 에너지가 발산되면서 다소 높은 진폭이 발생하여 기재와 본드 코팅층 사이의 층간 박리가 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 6(a)의 파단된 BOND시험편 사진에도 잘 나타나 있다. 용사피막의 파괴는 응력-변형율의 증가함에 따라 하중과 수직 방향으로 발생하며, 박리의 대부분은 변형율이 급격히 증가하는 넥킹(Necking)부에 집중되고, 파단부 근방을 벗어나면 다수의 피막 균열이 나타난다.

한편, TOP시험편의 경우 변형율 약 1%~5%의 구간에서 BOND시험편에는 없는 80dB이상의 높은 AE 진폭이 발생하고 있어, 이 구간에서 기재와 세라믹(TiO₂) 사이의 큰 열팽창계수 차이로 기재와 코팅층 사이에 많은 에너지가 축적되어 비교적 큰 규모의 박리가 일어나고, 이때 용사피막은 기재로부터 완전히 분리되어 탈락되기 때문에 TOP코팅층의 박리시 진폭은 BOND코팅층에 비해 높게 나타나며, 밀착성

은 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한, BT시험편의 AE 진폭 특성은 변형율이 약 6%~11%의 구간에서 80dB이상의 진폭이 TOP시험편에 비해 현저하게 증가하고, 이하의 진폭도 역시 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 기재와 밀착성이 비교적 양호한 본드(NI-4.5wt.%Al) 코팅층의 영향으로 기재와 탑(TiO₂) 코팅층사이의 열팽창계수의 차이가 어느 정도 완화된 결과로 탑(TiO₂) 코팅층과 본드(NI-4.5wt.%Al) 코팅층 사이의 층간 박리시 비교적 낮은 80dB이하의 진폭을 가진 음향방출이 일어나고, 탑 코팅층 내에서의 계면 박리시 비교적 높은 80dB 이상의 진폭을 가진 음향방출이 일어난 것으로 판단된다. 이러한 양상은 Fig. 10 (b)의 사진에도 잘 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 탑(TiO₂)층은 파괴시 충격에도 불구하고 일부가 본드층과 밀착되어 있으며, 기재와 본드 코팅층 사이의 박리도 BOND 시험편에 비해 심하지 않은 것으로 보아BT시험편의 본드 코팅층 표면에 생성된 압축잔류응력과 탑 코팅에 의한 표면소성변형 구속효과로 인하여 밀착성이 개선되어 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

플라즈마 용사법에 의해 탄소강(S45C)에 금속계 분말 Ni-4.5wt.%Al과 산화물계 세라믹 TiO₂를 코팅하여, 인장하중 부가시 용사피막의 박리 특성을 AE 법에 의해 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 플라즈마 용사에서 용사열에 의한 기재의 기계적 성질은 변하지 않으며, 코팅층의 박리는 BOND의

경우는 변형율 17%이후, TOP은 1%-5%, BT는 6%-11%에서 발생한다.

2. 용사 코팅재의 박리에 대한 AE Parameter는 사상수, 계수, 에너지 및 진폭이 유사한 경향을 나타내며, 박리가 발생하는 구간에서 AE 신호는 급격히 증가한다.
3. 코팅재의 밀착성은 BOND 코팅재가 우수하며, TOP 코팅재의 경우 기재와의 열팽창계수의 차이로 밀착성이 감소한다. BT 코팅재는 중간층(본드 코팅)의 삼입 효과에 의해 TOP 코팅재 보다 개선된다.

참고문헌

- 1) 서창민, 김경렬, 1997, 세라믹 코팅된 1Cr- Mo-0.25V강의 피로균열성장 특성, 대한기계공학회논문집(A), 제21권, 제10호, pp.1674-1682.
- 2) 岸武勝彦, 惠良秀則, 大坪文隆, 園田友紀, 1998, セミク基材へ溶射したセラミック溶射皮膜熱理による密着強さの改善, 溶射, Vol.34, No.3, pp.120-126.
- 3) 窪堀後文, 生田稔郎, 尹藤征郎, 1996, AE(Acoustic Emission)法及び超音波検査法による溶射皮膜の密着性の評價", 溶射, Vol.33, No.4, pp.32-39.
- 4) 오맹중, 1998, TiO₂ 세라믹 용사 코팅재의 강도 및 마멸 특성, 제주대학교 박사학위 논문
- 5) 김귀식, 1998, 플라즈마용사에 의한 세라믹 코팅 강재의 음향방출 특성, 한국동력기계공학회지, Vol.2, No.3, pp.49-54.