

〈論文〉

세라믹의 摩滅機構에 관한 破壞力學的 研究 — 摩滅實驗 結果의 考察 —

金石三* · 金載昊*

(1990년 1월 24일 접수)

Fracture Mechanics Study on Wear Mechanism of Ceramics — Discussions on Experimental Results of Wear Test —

Seock Sam Kim and Chae Ho Kim

Key Words: Ceramics(세라믹), Wear Mechanism(摩滅機構), Surface Crack(表面龜裂), Large Scale Wear(大規模摩滅), Small Scale Wear(小規模摩滅), Wear Zone(摩滅領域), Fracture Toughness(破壞韌性值), Wear Rate(摩滅率)

Abstract

Analytically induced wear mechanism of elastic body under Hertzian contact is applied in actual wear test of ceramics. There are two types of wear in ceramics, a large scale wear and a small scale wear. The large scale wear is commensurable with Hertzian contact area and the small scale wear with real contact area. Nondimensional parameter, S_c , is introduced and fully examined to estimate or predict wear rate of ceramics. Ceramic wear for $S_c \leq 0.8$ is in small scale wear and for $S_c \geq 1.6$ in large scale wear.

記號說明

a : Hertz 接觸荷重과 龜裂과의 거리
 c : Hertz 接觸半徑
 $d \equiv x$: 表面龜裂 길이
 d_c : 임계 龜裂길이
 d_{max} : 最大龜裂길이
 f : Hertz 接觸部의 摩滅係數
 f_c : 龜裂面 사이의 摩滅係數
 K_{IC} : 破壞韌性值
 K_{eff} : 有效應力擴大係數
 K_{emax} : 最大有效應力擴大係數
 L : 垂直荷重
 N : 回轉數
 P_0 : 最大 Hertz 應力

α : 表面龜裂이 摩滅粒子가 될 確率
 $\phi(x)$: 表面龜裂 길이 x 의 確率密度函數
 ϕ_0 : 균열의 경사각도(degree)

1. 序 論

脆性材料인 세라믹表面에 비커스壓子和 같은 硬
 족한 壓子로서 누르면 래디얼크랙과 가로크랙이 發
 生한다^(1~5). Evans등⁽⁶⁾은 가로크랙이 脆性破壞됨으
 로서 어브래시브 摩滅(abrasive wear)이 進行된다
 고 생각하여, 破壞力學的 考察을 하였다. 著者^(7~9)
 는 無潤滑下에서의 구름接觸狀態時의 세라믹의 巨
 視的 摩滅特性和 SEM을 利用한 摩滅面과 摩滅粒
 子の 微視的 觀察을 통해서, 세라믹의 摩滅機構는
 세라믹의 燒結課程이나 研磨課程에서 發生된 것으
 로 추정되는 表面龜裂의 脆性破壞에 起因한다고 報

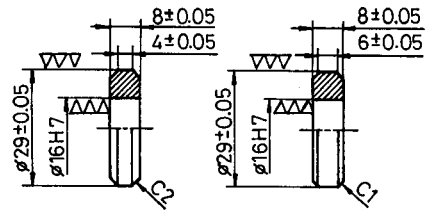
*正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

告하였다. 또 그 摩滅形態는 小規模摩滅과 大規模 摩滅의 2種類로 分類되는 것도 밝혔다. 위와 같은 實驗結果와 研究報告들을 根據로하여 Hertz 接觸 荷重의 移動에 따른 傾斜진 表面龜裂의 傳播舉動을 破壞力學的 觀點에서 調查 報告한 바 있다⁽¹⁰⁾.

本 報에서는 前報⁽¹⁰⁾에서 遂行한 理論解析의 結果를 實驗結果에 適用하여 세라믹의 摩滅形態를 破壞力學的 견지에서 考察하고, 새로운 세라믹의 摩滅理論과 摩滅評價를 위한 파라메타를 提案하고자 한다.

2. 實 驗

Fig. 1에 本 實驗에 使用된 試驗片의 形狀과 크기를 나타내었다. 上下部 試驗片의 直徑은 같



Upper specimen Lower specimen

Fig. 1 Shape and size of specimen

29mm이다. 上部試驗片은 두께를 4mm로 하고, 下部試驗片은 摩滅量을 測定하기 위하여 두께를 6 mm로 하였다. 摩滅狀態는 上下試驗片이 圓筒형으로 線接觸을 하는 相互 구름마찰 상태에 있다. 試驗片 材料는 機械構造用 세라믹으로 有望시 되고

Table 1 Specifications of test specimen

Materials	Si ₃ N ₄	Cermet	SiC	TiO ₂	Al ₂ O ₃
Surface roughness R_{max} , μm	2.1	1.7	1.7	1.9	2.8
Vickers hardness,	1532	1426	2541	591	1783
Bending strength, GPa	0.49	1.47	0.49	0.15	0.30
Elastic modulus, GPa	294	441	392	167	343
Poisson's ratio	0.27	0.21	0.16	0.26	0.25
Fracture toughness, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	5.2	10.2	4.2	2.8	4.0
Density, g/cm^3	3.25	6.04	3.04	3.21	3.84
Coefficient of thermal expansion(40-400°C), $10^{-6}/^\circ\text{C}$	3.7	7.4	3.6	8.4	7.1
Thermal conductivity(20°C), $\text{Cal}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$	0.03	0.04	0.16	-	0.06

Table 2 Experimental conditions in rolling contact

Materials	Speed rpm	Load N	Semi-contact -width μm	Hertz stress	
				Max., GPa	Mean, GPa
Si ₃ N ₄	800	980	122	1.28	1.01
		1960	172	1.82	1.43
Cermet	800	980	95	1.51	1.19
		1960	134	2.13	1.68
SiC	800	980	102	1.41	1.11
		1960	144	1.99	1.56
TiO ₂	800	980	152	0.94	0.74
		1960	216	1.33	1.04
Al ₂ O ₃	800	980	107	1.34	1.06
		1960	151	1.90	1.49

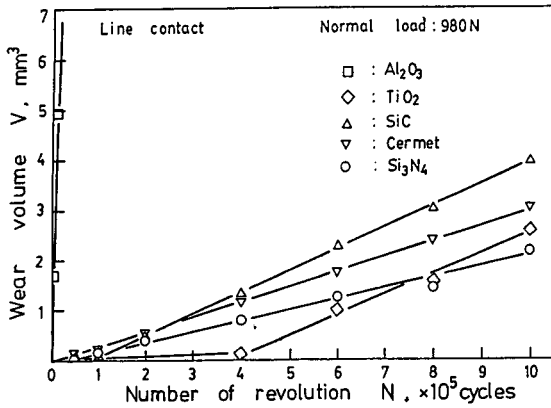


Fig. 2 Relationship between wear volume and number of revolution under the load of 980N

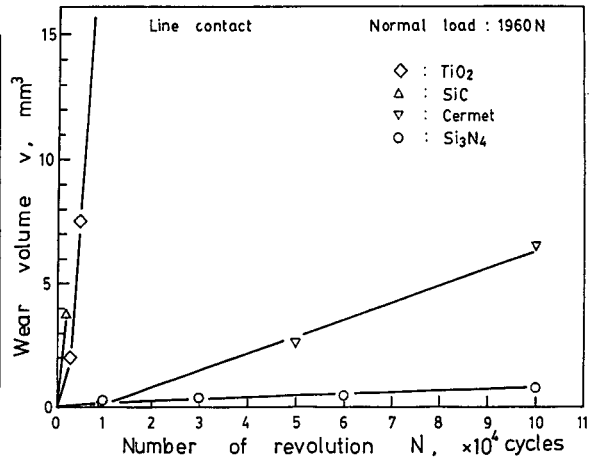


Fig. 3 Relationship between wear volume and number of revolution under the load of 1960N

Table 3 Specific wear rate and wear coefficient in steady wear

Materials	Specific wear rate W_s , mm ³ /m.N		Wear coefficient K	
	980N	1960N	980N	1960N
Si ₃ N ₄	2.48×10^{-8}	5.81×10^{-8}	3.72×10^{-7}	4.36×10^{-7}
Cermet	3.61×10^{-8}	7.94×10^{-7}	5.04×10^{-7}	5.55×10^{-6}
SiC	4.89×10^{-8}	2.10×10^{-5}	1.22×10^{-6}	2.61×10^{-4}
TiO ₂	4.55×10^{-8}	3.07×10^{-5}	2.64×10^{-7}	8.89×10^{-5}
Al ₂ O ₃	2.22×10^{-5}	—	3.89×10^{-4}	—

있는 窒化珪素(Si₃N₄), 서어멧, 炭化珪素(SiC), 티티니아(TiO₂), 알루미늄(Al₂O₃)이다. 이들 세라믹 시험편은 모두 常壓燒結法으로 제작하여 연마가 공 하였다. 이들 시험片材料의 物理的·機械的 性質은 Table 1과 같다. 本實驗에 使用된 試驗機는 구름摩擦摩滅試驗機⁷⁾로서, Fig. 1의 上下試驗片을 相互接觸回轉시키고, 回轉速度는 800rpm으로 一定하게 하였다. 荷重은 980N과 1960N으로 하였다. Table 2는 荷重 980N 과 1960N下에서 두 시험편에 발생하는 Hertz接觸部の 크기와 Hertz 應력의 計算값 들이다. 摩滅實驗은 모두 無潤滑狀態로 常溫·常壓下에서 遂行하였다. 摩滅量의 測定은 一定回轉數만큼 摩滅시킨 後, 斷面曲線의 摩滅部分의 斷面積을 플래니미터로서 구하여 摩滅量을 산출하였다. 摩滅面과 摩滅粒子는 SEM으로서 觀察하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 同一 세라믹材料間의 摩滅實驗 結果로 얻어진 摩滅率과 摩擦回轉數와의 關係를 나

타낸 것이다. 無潤滑狀態下에서의 세라믹 摩滅量은 一定回轉 以後에는 回轉數가 增加함에 따라 直線적으로 增加한다. 이 狀態를 여기서는 正常摩滅狀態 (steady wear)라고 定義한다. 荷重 1960N에서 Al₂O₃에 대한 摩滅實驗은 不可能하였다.

Table 3은 摩滅實驗에서 얻어진 正常摩滅狀態에서의 比摩滅率(specific wear rate)과 摩滅係數(wear coefficient)를 나타낸 것이다. Table 3에서

Table 4 Surface roughness in steady wear (R_{max} , μm)

Material	Line contact	
	980N	1960N
Si ₃ N ₄	2.5	4.2
Cermet	2.1	3.5
SiC	2.0	22.8
TiO ₂	4.7	18.4
Al ₂ O ₃	25.0	—
SUJ2	—	—

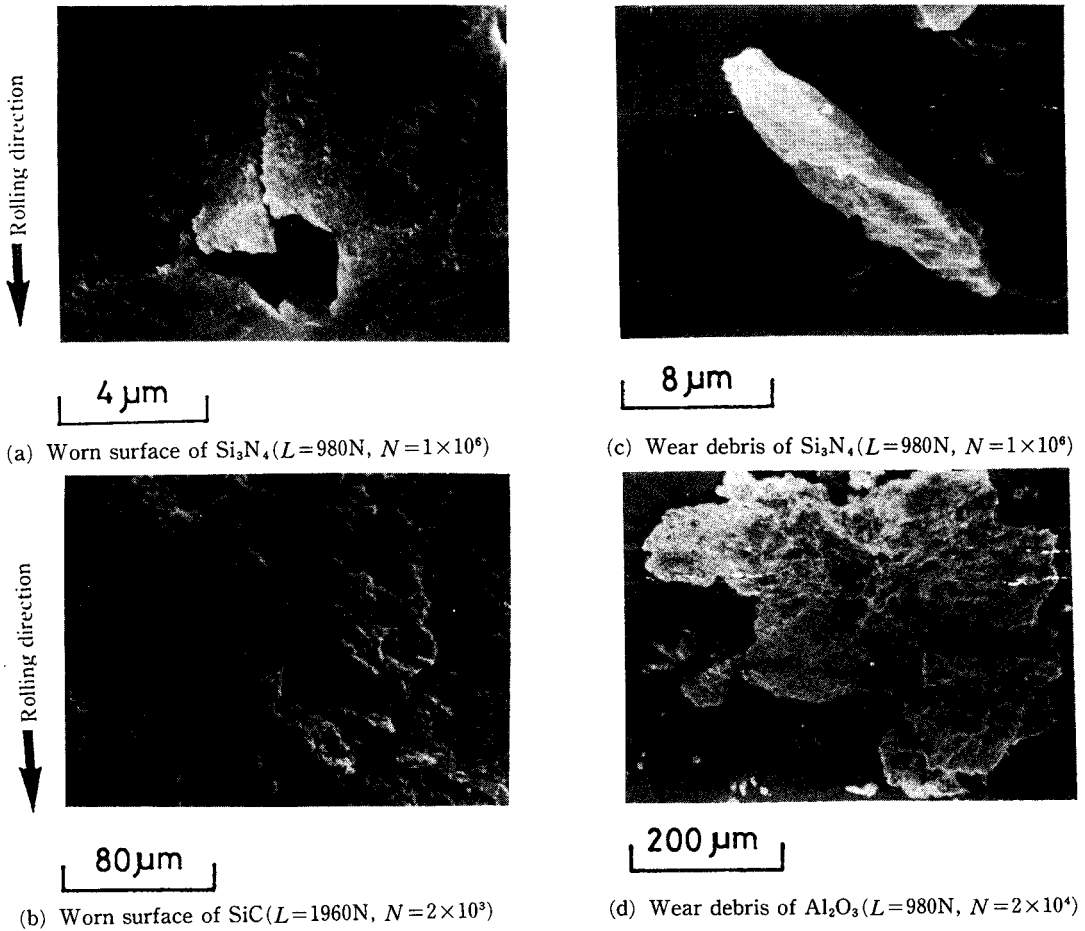


Fig. 4 Scanning electron micrographs of typical worn surfaces and wear debris

알 수 있는 바와 같이 Si_3N_4 의 摩滅率은 10^{-8} , Al_2O_3 의 摩滅率은 10^{-5} 의 次數를 보이는데, 이것은 Al_2O_3 의 摩滅量이 Si_3N_4 의 摩滅量의 약 10^3 배 임을 의미한다. Table 4에는 正常摩滅狀態에 있는 摩滅面의 表面거칠기를 나타내었다.

Fig. 4는 몇 가지 경우의 摩滅面과 摩滅粒子에 대한 SEM사진이다. Fig. 4(a)는 荷重 980N, 회전수 1×10^6 後의 Si_3N_4 의 摩滅面의 SEM사진이다. 表面의 결함으로부터 龜裂이 進進하여 摩滅粒子가 발생되려고 하는 상태이다. Fig. 4(b)는 荷重 1960 N, 회전수 2×10^3 後의 SiC 摩滅面의 SEM사진이다. 두께가 약 $25 \mu\text{m}$ 의 摩滅粒子가 탈락된 상태이다. Fig. 4(c)는 荷重 980N, 회전수 1×10^6 後에 발생한 Si_3N_4 의 摩滅粒子이다. 摩滅粒子의 두께가 약 $1 \mu\text{m}$, 길이 $19 \mu\text{m}$ 정도의 板狀의 摩滅粒子이다. Fig. 4(d)는 크기가 약 $600 \mu\text{m}$ 의 큰 板狀의 Al_2O_3

摩滅粒子이다. Table 4의 表面거칠기와 Fig. 4의 摩滅粒子크기와의 相關性으로부터, 摩滅粒子가 脫落된 後의 摩滅面 形狀이 表面거칠기를 바로 나타낸다고 생각할 수 있다.

이와같이 SEM을 이용한 微視的 觀察結果, 세라믹의 摩滅狀態는 마멸粒子의 크기가 수십 μm 以下, 두께가 수 μm 정도의 板狀摩滅粒子가 발생하는 小規模摩滅과 摩滅粒子의 크기가 $100 \sim 800 \mu\text{m}$, 두께가 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 의 板狀摩滅粒子가 많이 發生하는 大規模摩滅로 分類할 수 있었다.

3. 理論解析의 適用

3.1 摩滅領域概念의 導入

表面龜裂에 대한 前報⁽¹⁰⁾의 破壞力學的 解析結果로부터 無次元龜裂의 길이(d/c)와 無次元最大有

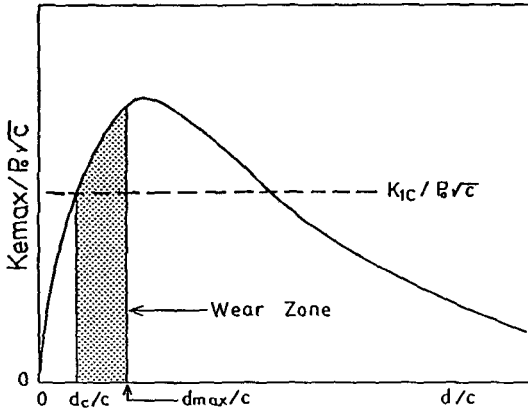


Fig. 5 Schematic diagram of wear zone

효율력擴大係數($K_{emax}/P_0\sqrt{c}$)와의 關係를 概略的으로 도시하면 Fig. 5와 같다. 세라믹의 破壞靱性值 $K_{IC} \leq K_{emax}$ 를 만족하는 表面龜裂이 세라믹表面에 存在한다면, 이 균열은 傳播條件을 만족하므로 傳播하게 된다. 이 균열의 길이를 臨界表面龜裂길이 d_c 라고 定義한다. 또 세라믹表面에 存在하는 最大表面龜裂길이를 d_{max} 라고 하면, Fig. 5에서 d_c/c 와 d_{max}/c 사이의 表面龜裂들은 모두 傳播條件 $K_{IC} \leq K_{emax}$ 를 만족하므로 傳播를 계속하여 摩滅粒子가 될 것이다. 이 領域을 摩滅領域(wear zone)이라고 定義한다. K_{IC} 가 크고 $P_0\sqrt{c}$ 가 작으면, 摩滅領域이 相對的으로 減少하므로 摩滅率이 작게 된다. 이것은 實驗結果와도 一致한다.

3.2 表面龜裂의 分布와 S_c 파라미터

세라믹은 일반적으로 微小粉末을 原料로하여 제조된다. 따라서 微小粉末의 크기, 燒結方法, 成形方法, 加工方法에 따라서 세라믹 表面에 散在하는 表面龜裂의 分布가 多様할 것으로 생각이 된다. 本研究에서는 摩滅粒子의 形狀分布에 관한 研究結果^(11,12)를 근거로 하여 세라믹表面에 散在해 있는 表面龜裂의 分布函數를 다음과 같이 표시한다.

$$\Phi(x) = \frac{1}{d_{max}} \ln\left(\frac{x}{d_{max}}\right)^{-1} \quad (1)$$

여기서 x 는 平均의상 표면균열의 길이 d 를 대신하여 사용한 것이고, $\Phi(x)$ 는 表面龜裂의 길이 x 의 確率密度函數이며, d_{max} 는 最大表面龜裂길이이다.

세라믹 表面에 存在하는 表面龜裂중에서 摩滅粒子가 될 確率 α 는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\alpha = \int_{d_c}^{d_{max}} \Phi(x) dx$$

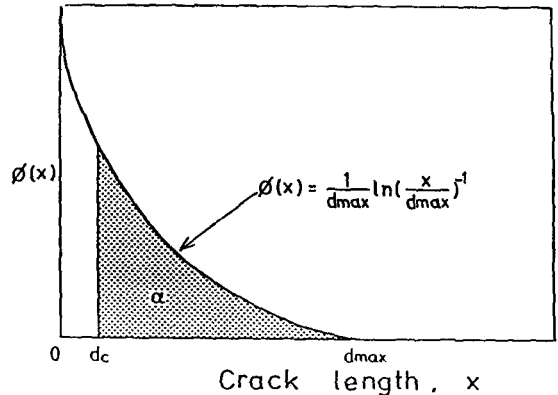


Fig. 6 Schematic diagram of probability density function of surface crack

$$= 1 - \frac{d_c}{d_{max}} + \frac{d_c}{d_{max}} \ln\left(\frac{d_c}{d_{max}}\right) \quad (2)$$

Fig. 6은 $\Phi(x)$ 의 概形과 α 의 意味를 圖示한 것이다.

여기서 臨界龜裂길이 d_c 는 세라믹 表面상을 Hertz 接觸荷重이 이동 할 경우 最大有效應力擴大係數 K_{emax} 가 세라믹의 破壞靱性值 K_{IC} 와 같게 될 경우의 表面龜裂의 길이 이다. 따라서 d_c 는 다음식과 같이 주어진다.

$$d_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{P_0 A} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 A 는 表面龜裂의 길이와 傾斜角에 의해 결정되는 常數이다. 本研究에서는 實驗에서 얻어진 摩滅粒子가 板狀인 것을 勘案하여, 表面에 垂直한 龜裂만을 고려의 대상으로 하여, 세라믹 摩滅機構의 大體的인 傾向을 高찰하고자 한다. 식 (2), (3)으로 부터 α 는 다음과 같이 $K_{IC}/P_0\sqrt{d_{max}}$ 의 函數로 표시된다.

$$\alpha = 1 - \frac{1}{\pi A^2} \left(\frac{K_{IC}}{P_0\sqrt{d_{max}}} \right)^2 + \frac{1}{\pi A^2} \left(\frac{K_{IC}}{P_0\sqrt{d_{max}}} \right)^2 \ln \left[\frac{1}{\pi A^2} \left(\frac{K_{IC}}{P_0\sqrt{d_{max}}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

식 (4)로서 주어지는 α 와 $K_{IC}/P_0\sqrt{d_{max}}$ 과의 關係式의 概形을 Fig. 7에 나타내었다. $K_{IC}/P_0\sqrt{d_{max}}$ 가 增加할수록 α 값은 減少하게 된다. 즉, 세라믹 재료의 破壞靱性值 K_{IC} 가 크고 相互接觸部의 最大 Hertz 應力의 P_0 와 最大龜裂의 길이 d_{max} 가 작을수록, 摩滅率이 작게 된다는 것을 의미한다. 여기서 實用的인 면을 考慮한 세라믹의 摩滅率 評價를 위해서, 식 (5)와 같이 定義되는 無次元 파라미터

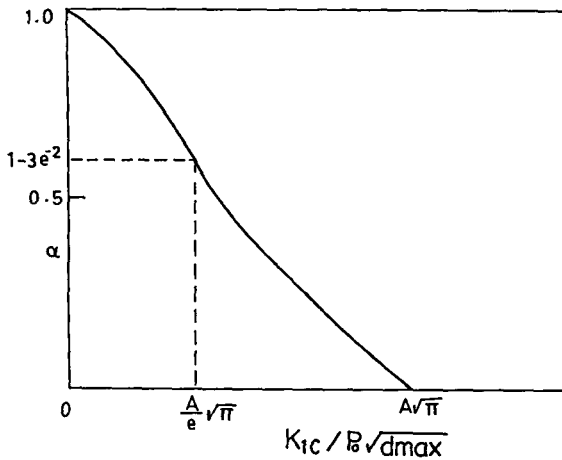


Fig. 7 Schematic diagram of $K_{Ic}/P_0\sqrt{d_{max}}$ vs. α

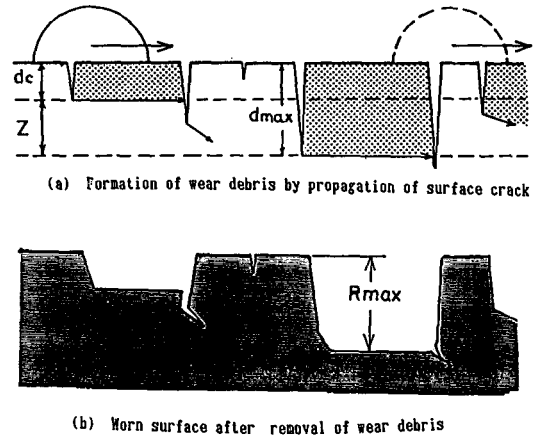


Fig. 8 Modeling of formation of surface foughness in ceramics

S_c (severity of contact)를 導入한다.

$$S_c = \frac{P_0\sqrt{d_{max}}}{K_{Ic}} \quad (5)$$

無次元 파라미터 S_c 는 接觸部の 幾何學的 形狀과 세라믹의 材料特性值에 의해 결정되는 最大 Hertz 接觸壓力 P_0 , 세라믹의 破壞韌性值 K_{Ic} , 表面缺陷狀態值 d_{max} 로서 이루어져 있다.

3.3 S_c 파라미터에 의한 세라믹 摩滅評價

無次元 파라미터 S_c 를 定義하는 式 (5)에는 最

大表面龜裂길이 d_{max} 가 포함되어 있다. d_{max} 의 實際測定은 현재로서는 매우 어렵다. 여기서 脆性材料인 세라믹의 定常摩滅狀態에 있는 摩滅面의 最大表面거칠기의 形成과정을 생각한다. Fig. 8(a)와 같이 여러가지 크기의 表面龜裂을 갖는 세라믹 表面상에 接觸部가 이동할 경우, 表面龜裂 선단의 最大有效應力擴大係數가 그 세라믹의 破壞韌性值 이상일 때 表面龜裂은 傳播하여 摩滅粒子로서 탈락될 것이다. 摩滅粒子가 탈락한 후의 摩滅面은 Fig. 8(b)와 같이 될 것이므로 $d_{max} \approx R_{max}$ 로 간주

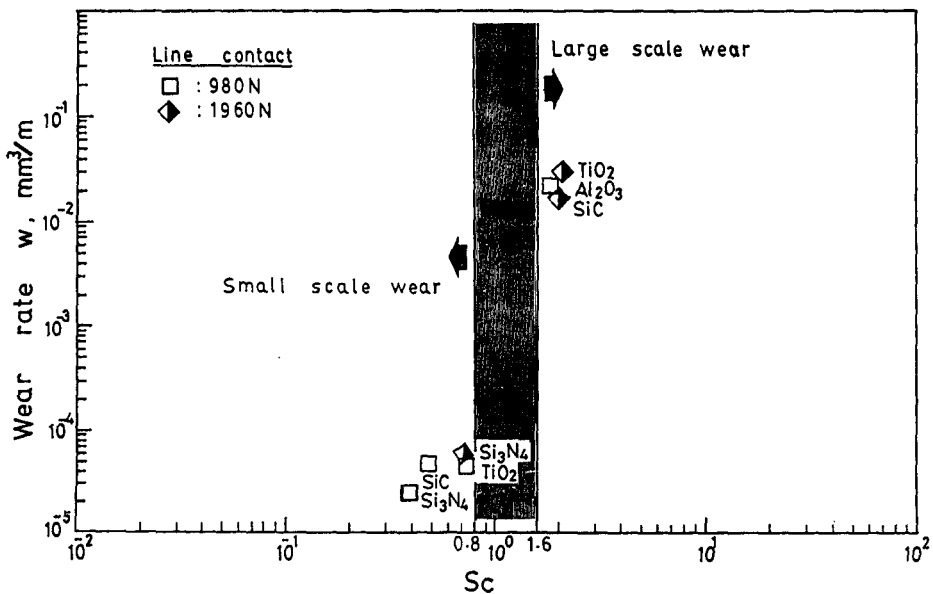


Fig. 9 Relationship between wear rate and S_c parameter

하여, 式 (5) 중의 最大表面龜裂길이 d_{max} 대신에 摩滅面의 最大높이 거칠기인 R_{max} 를 사용한다. 즉, 式 (5)는

$$S_c = \frac{P_0 \sqrt{R_{max}}}{K_{Ic}} \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 9는 파라미터 S_c 와 本 實驗에서 얻은 세라믹의 摩滅率 W 와의 관계를 兩 대수 그래프상에 나타낸 것이다. Fig. 9에서는 摩滅率 W (mm^3/m)가 10^{-4} 次數이하인 그룹과 10^{-2} 次數 이상인 그룹으로 나누어 진다. 이것은 세라믹의 摩滅形態가 小規模摩滅 (small scale wear)과 大規模 摩滅 (large scale wear)로 分類됨을 의미한다. 즉, $S_c \leq 0.8$ 은 小規模 摩滅영역, $S_c \geq 1.6$ 은 大規模 摩滅영역, $0.8 \leq S_c \leq 1.6$ 은 遷移 領域이라고 할 수 있다. 點接觸 狀態의 세라믹의 摩滅率과 파라미터 S_c 와의 관계는 兩 대수 그래프상에 일직선으로 整理, 報告된 바 있다⁽¹³⁾.

3.4 세라믹의 摩滅形態에 대한 破壞力學的 考察

前報⁽¹⁰⁾의 理論解析 結果를 本 實驗結果에 適用시켜 세라믹의 摩滅形態에 대하여 考察해 보고자 한다. 理論解析의 適用에 있어서 最大높이 거칠기

R_{max} 의 값을 表面龜裂의 최대 길이 d_{max} 로 대신하는 것은 前述한 바와 같고, 表面에 垂直한 龜裂과 45°경사진 균열에 대해서 解析하였다.

Fig. 10(a)(b)는 Si_3N_4 간 接觸摩擦시 荷重 980N의 경우, Hertz 接觸荷重이 龜裂로부터의 無次元 거리 a/c 가 -4에서 +4까지 이동하는 동안 無次元 有效應力擴大係數 $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ 의 變化를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 表面에 垂直한 龜裂($\phi_0 = -90^\circ$), Fig. 10(b)는 表面과 45°傾斜진 龜裂($\phi_0 = -45^\circ$)의 結果이다. Hertz 接觸部 및 龜裂面 사이의 摩擦係數는 無潤滑狀態에 해당되는 값 0.7로 하였다. Table 2로부터 荷重 980N의 경우, Hertz 接觸반경은 $c = 122 \mu\text{m}$ 이고, 최대 Hertz 應력은 $P_0 = 1.28 \text{ GPa}$ 이다. Table 4의 實驗結果에서 摩滅面의 平均表面거칠기 값은 $2.5 \mu\text{m}$ R_{max} 이었다. Table 1로부터 Si_3N_4 의 破壞靱性值 $K_{Ic} = 5.2 \text{ MPam}^{1/2}$ 이므로 $K_{Ic}/P_0\sqrt{\pi d} \approx 1.45$ 이다. 이 값은 Fig. 10(a)에서 알 수 있는 바와 같이 $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ 의 最大值보다 크다. 즉, 이 경우의 表面龜裂은 $K_{Ic} > K_{eff}$ 로서 傳播條件을 만족하지 않으므로, Hertz 接觸單位の 摩滅은 發生하지 않는다. 이때 S_c 의 값은 0.39이다. 機械加工된 세라믹의 表面이 相互接觸을 하고 있을 경우에도 金屬面間的 相互接觸의 경우와 마찬가지로 眞實接觸面積 (real

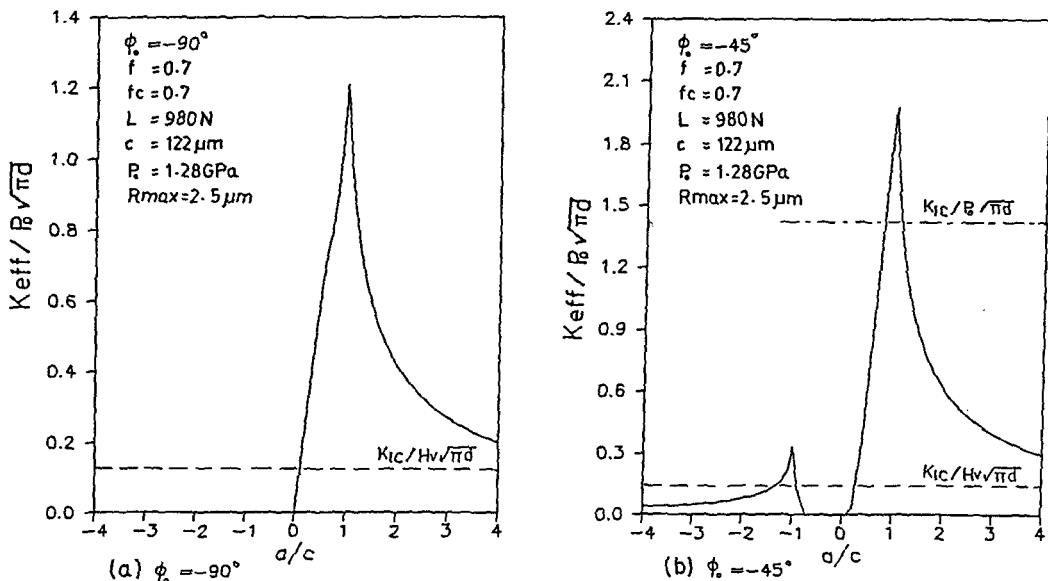


Fig. 10 Variations of $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ with distance between surface crack and Hertzian contact under the load of 980N (Si_3N_4 - Si_3N_4)

contact area)⁽¹⁴⁾ 概念이 成立한다. Tabor⁽¹⁵⁾는 表面凹凸로 인한 眞實接觸面積은 荷重과 더불어 증가한다고 주장하였고, 그의 研究者들도 眞實接觸面積과 接觸點의 數(number of contact spots)는 荷重과 더불어 증가하나, 接觸點의 平均面積(mean area of contact spots)과 眞實接觸面積의 平均壓力는 荷重에 關係없이 일정함을 보였다^(16~20).

Bowden과 Tabor⁽¹⁴⁾는 眞實接觸面積 A_r 을 다음과 같이 나타내었다.

$$A_r = \frac{W}{H_v} \quad (7)$$

여기서 W 는 垂直荷重이고, H_v 는 材料의 비커스 硬度이다. 식 (7)로부터 眞實接觸面積에 작용하는 壓力은 그 재료의 硬度和 동일함을 알 수 있다. Table 1에서 Si_3N_4 의 硬度 H_v 는 1532 kg/mm^2 로서 15.01 GPa 에 相當하고, Table 2에서 荷重 980 N 의 경우 Si_3N_4 의 平均 Hertz 壓力은 1.01 GPa 이다. 兩者의 값을 比較하여 볼때, 眞實接觸面積은 Hertz 接觸面積(apparent Hertzian contact area)의 1/15정도 임을 알 수 있다. 따라서 最大 Hertz 應力 P_0 대신에 Si_3N_4 의 비커스 硬度 $H_v=1532 \text{ kg/mm}^2$ 을 代入하면, $K_{IC}/H_v\sqrt{\pi d}=0.13$ 이다. 이 값은 Fig. 10(a)에서 점선으로 표시한 것과 같이 $a/c=0.2$ 近處에서 부터 表面分裂의 傳播條件을 만족하므로 眞實接觸面積單位의 摩滅이 發生한다. 이것

은 小規模 摩滅에 속한다. 한편 Fig. 10(b)와 같이 表面과 45° 傾斜진 表面龜裂의 경우는 $K_{IC} < K_{eff}$ 를 만족하므로 Hertz 接觸面積單位의 摩滅이 發生한다. 즉 같은 길이의 表面龜裂이 表面과 45° 傾斜진 경우에는 大規模 摩滅이 發生한다. 또한 Fig. 10(b)의 點線($K_{IC}/H_v\sqrt{\pi d}$)으로부터 알 수 있는 바와 같이 眞實接觸面積單位의 摩滅도 發生한다. 즉 Fig. 10(b)에서는 小規模 摩滅과 大規模 摩滅이 동시에 發生한다.

Fig. 11(a)(b)는 荷重 980 N 의 경우 Al_2O_3 의 實驗結果에 理論解析모델을 適用한 것이다. Fig. 11(a)는 表面과 垂直한 龜裂($\phi_0 = -90^\circ$), Fig. 11(b)는 表面과 45° 傾斜진 龜裂($\phi = -45^\circ$)의 結果이다. Table 1로부터 Al_2O_3 의 破壞韌性值 $K_{IC}=4.0 \text{ GPam}^{1/2}$ 이므로, $K_{IC}/P_0\sqrt{\pi d} < K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ 되는 경우도 있다. 즉, 이 경우는 Hertz 接觸單位의 摩滅이 發生한다. 이와 같이 Hertz 接觸面積單位로 摩滅이 發生하는 것은 大規模摩滅에 속한다. 물론 $K_{IC}/H_v\sqrt{\pi d} < K_{eff}P_0\sqrt{\pi d}$ 이므로 眞實接觸面積單位의 小規模 摩滅도 동시에 發生한다. 이때 파라미터 S_c 의 값은 1.68이다.

동일한 方法으로 SiC에 대해 荷重 980 N 과 荷重 1960 N 의 경우의 實驗結果에 理論解析모델을 적용한 예를 Fig. 12(a)(b)와 Fig. 13(a)(b)에 각각 나타내었다. Fig. 12(a)에서는 荷重 980 N 의 경우로

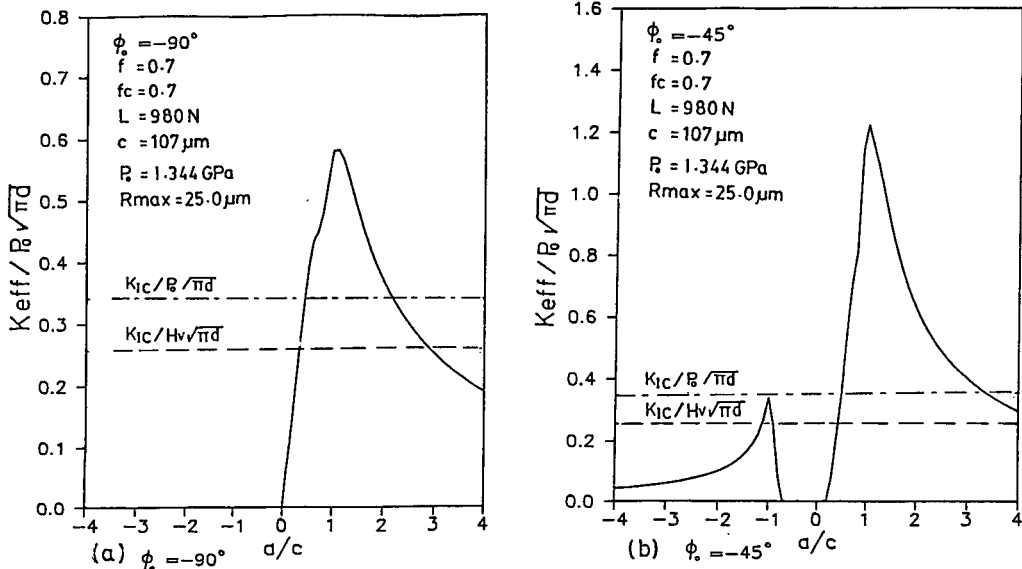


Fig. 11 Variations of $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ with distance between surface crack and Hertzian contact under the load of 980 N ($Al_2O_3-Al_2O_3$)

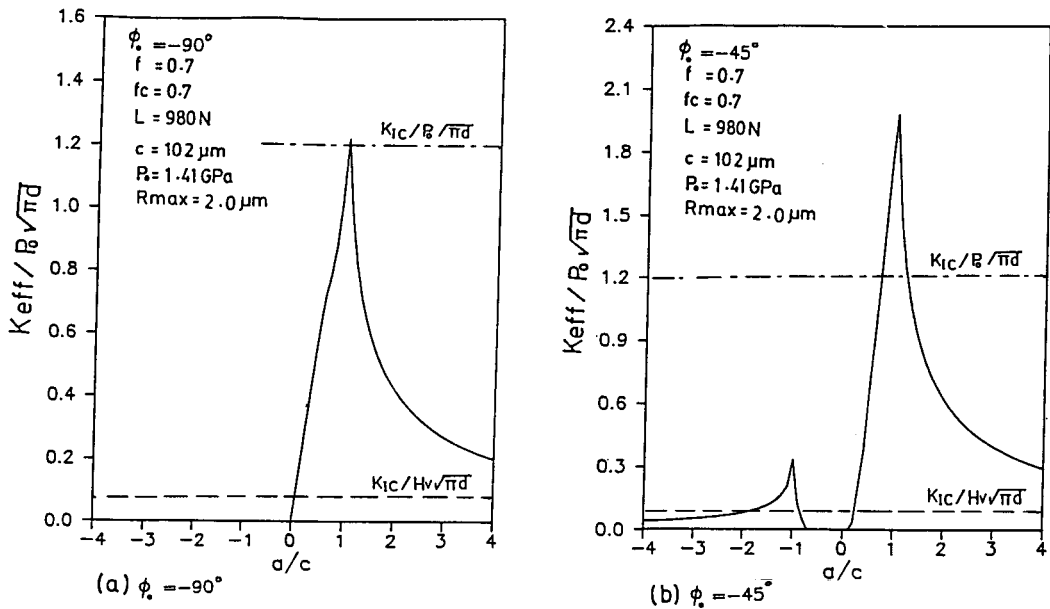


Fig. 12 Variations of $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ with distance between surface crack and Hertzian contact under the load of 980N(SiC-SiC)

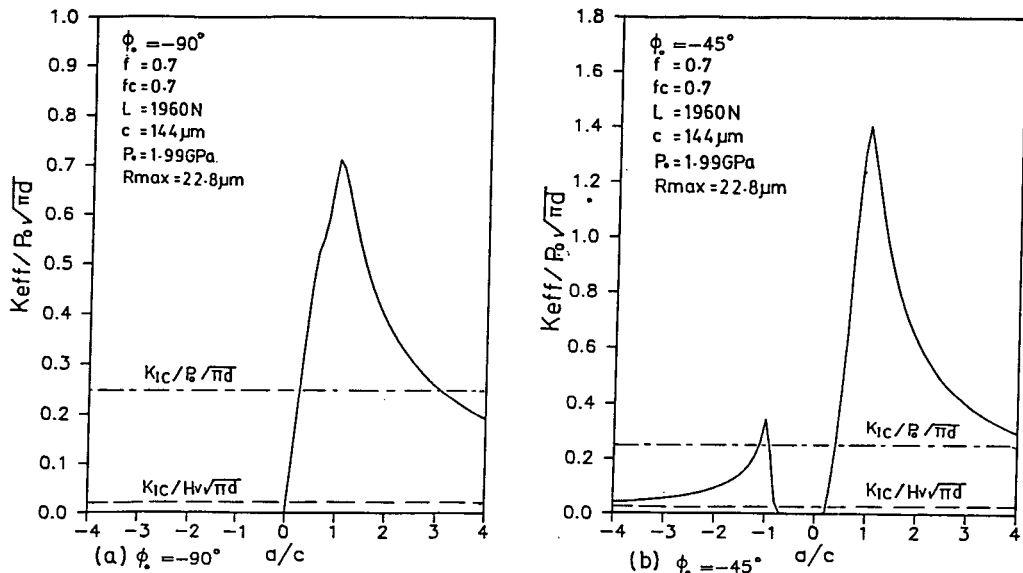


Fig. 13 Variations of $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ with distance between surface crack and Hertzian contact under the load of 1960N(SiC-SiC)

서 $K_{IC}/P_0\sqrt{\pi d}$ 가 $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ 보다 항상 크기 때문에 Hertz 接觸面積單位的 摩滅은 發生하지 않으므로 大規模 摩滅은 發生하지 않는다. 한편, Fig. 12(b)와 같이 表面과 45° 傾斜진 龜裂의경우는 大規模 摩滅이 發生한다. 이때 S_c 의 값은 0.47이다. 그러나 Fig. 13(a)(b)와 같이 荷重이 1960N의 경

우는 $K_{IC}/P_0\sqrt{\pi d}$ 가 $K_{eff}/P_0\sqrt{\pi d}$ 보다 적게되는 部分이 있으므로 Hertz 接觸面積單位的 大規模 摩滅이 發生함을 알 수 있다. 이 경우 S_c 의 값은 2.26이다. 즉, 荷重 980N의 경우는 주로 小規模 摩滅 形態임을 알 수 있다. 이상과 같이 본 實驗에서 얻어진 實驗結果를 理論解析모델에 適用하여 破壞力

學的 考察을 遂行한 結果 Fig. 9에 分類된 大規模 摩滅은 Hertz 接觸面積單位の 摩滅에 起因하고 小規模 摩滅은 眞實接觸面積단위의 摩滅에 起因한다고 할 수 있다.

4. 結 論

Hertz 接觸荷重의 移動에 의한 表面龜裂의 傳播 거동의 理論解析을 實驗結果에 適用시켜 세라믹의 摩滅機構를 破壞力學的으로 考察하였다. 理論解析의 모델이 實驗結果를 잘 설명하여 주는 適切한 모델임을 알 수 있었다. 그 結果 새로운 세라믹의 摩滅理論과 摩滅評價를 위한 S_c 파라미터가 제안되었다. 線接觸狀態下에서의 세라믹의 摩滅狀態는 S_c 파라미터에 의해서 다음과 같이 分類된다. 즉, $S_c \leq 0.8$ 인 경우는 小規模 摩滅, $S_c \geq 1.6$ 인 경우는 大規模 摩滅, $0.8 \leq S_c \leq 1.6$ 에서는 遷移領域이 된다.

後 記

本 論文은 1988年度 文教部支援 韓國學術振興財團의 自由公募課題 學術研究造成費에 의하여 研究되었으며, 이에 關係者 여러분께 感謝드립니다. 또 本 研究에 좋은 助言을 하여주신 日本東北大學校 機械工學科의 加藤康司 教授와 堀切川一男 博士에게 感謝드립니다.

參 考 文 獻

- (1) Lawn, B.R. and Swain, M.V., 1975, "Micro Fracture beneath Point Indentation in Brittle Solids", J. Mater. Sci., Vol. 10, pp. 113~122.
- (2) Lawn, B. R. and Evans, A.G., 1977, "A Model for Crack Initiation in Elastic/Plastic Indentation Fields", J.Mater. Sci., Vol. 12, pp. 2195~2199.
- (3) Evans, A.G. and Willshaw, T.R., 1976, "Quasistatic Solid Particle Damage in Brittle Solids-1. Observations, Analysis and Implications", Acta Metall., Vol. 24, pp. 939~956.
- (4) Lawn, B.R., Evans, A.G. and Marshall, D.G., 1980, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics : The Median/Radial Crack System", J.Am. Ceram. Soc., Vol. 63, No. 9-10, pp. 574~581.
- (5) Marshall, D.B., Lawn, B.R. and Evans, A.G., 1982, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics : The Lateral Crack System", J.Am. Ceram. Soc., Vol. 65, No. 11, pp. 561~566.
- (6) Evans, A.G. and Marshall, D.B., 1980, "Wear Mechanisms in Ceramics", Fundamentals of Friction and Wear of Materials, ASM, pp. 439~452.
- (7) 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, 1989, "구름 접촉시 세라믹의 거시적 마모특성", 潤滑學會誌, 第5卷, 第1號, pp. 28~35.
- (8) 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, 1989, "SEM 관찰에 의한 세라믹의 구름 마모기구", 潤滑學會誌, 第5卷, 第1號, pp. 36~43.
- (9) 金石三, 加藤康司, 堀切川一男, 1986, "アルミナセラミックス의 燒付き와 摩耗特性", 潤滑, 第31卷, 第5號, pp. 329~335.
- (10) 金載昊, 金石三, 朴重漢, 1990, "반무한 탄성체의 헤르츠 접촉하의 경사진 표면균열의 전파거동", 대한 기계학회논문집, 제14권, 제3호, 624~635.
- (11) 宣場孝雄, 加藤康司, 赤友治, 1984, "摩耗의 페로그래피的研究(第1報) - 自記分離による 摩耗粒子分析法의 基本特性 -", 潤滑, 第29卷, 第10號, pp. 745~752.
- (12) 場孝雄, 加藤康司, 赤友治, 1985, "摩耗의 페로그래피的研究(第2報) - 自記分離裝置による 摩耗狀態의 評價 -", 潤滑, 第30卷, 第7號, pp. 507~514.
- (13) Kim, S.S., Kato, K., Hokkirigawa, K. and Abé, H., 1986, "Wear Mechanism of Ceramic Materials in Dry Rolling Friction", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol. 108, pp. 522~526.
- (14) Bowden, F.P. and Tabor, D., 1950, "The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press. Oxford, pp. 5~32.
- (15) Tabor, D., 1959, "Junction Growth in Metallic Friction : The Role of Combined Stresses and Surface Contamination", Proc. R. Soc., Ser. A251, pp. 378~393.
- (16) Kragelsky, I.V. and Demkin, N.B., 1960, "Contact Area of Rough Surfaces", Wear, Vol. 3, pp. 170~187.
- (17) Yamada, K., Takeda, N., Dagami, J. and Naoi, T., 1978, "Mechanisms of Elastic Contact and Friction between Rough Surfaces", Wear, Vol. 48, pp. 15~34.
- (18) Quinn, T.F.J. and Winer, W.L., 1985, "The Thermal Aspects of Oxidational Wear", Wear, Vol. 102, pp. 67~80.
- (19) Allen, C.B., Quinn, T.F.J. and Sullivan, J.L., 1985, "The Oxidational Wear of High-Chromium Ferritic Steel on Austenitic Stainless Steel", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol. 107, pp. 172~179.
- (20) Lim, S.C. and Ashby, M.F., 1987, "Wear-Mechanism Maps", Acta metall., Vol. 35, No. 1, pp. 1~24.