

〈논 문〉 SAE NO. 953774

자동차용 촉매장치구조의 설계개선에 관한 연구

A Study on the Improved Design for Automotive Catalytic Converter

박 영 철*
Y. C. Park

ABSTRACT

This paper presents the effect of the component performance for mat supported monolithic cordierite ceramic underflow catalytic converters to meet the new stringent durability requirements of the world's. These objectives are met by a conceptual system approach of mat mounting material with stainless steel can(shell), and heatshield(cover), which are related to the mat erosion, a main failure pattern of the mat supported monolithic ceramic catalytic converters.

In this paper we study the individual component behavior of mat erosion problem, After studying, we obtain the characteristics of the component performance for automotive catalytic converters and the overall understanding of design considerations in catalytic converters.

주요기술용어 : Gap Bulk Density(틈새부피밀도), Mat Erosion(매트침식), Mean Mounting Pressure(평균지지압력), Canning(캐닝)

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 자동차 배기 중의 유해물질 배출규제 및 관련부품의 보증기간이 날로 늘어나고 있으며, 배출가스 관련 부품에 대한 내구 보증이 중요한 현안으로 되고 있다. 배출가스 관련부품 중에서도 특히 촉매장치는 배기가스 정화측면에서 가장 중요한 역할을 할뿐만 아니라 고가 부품이며, 사용환경조건 또한 고온, 고압,

고진이 작용하는 배기계의 열악한 조건이기 때문에, 충분한 내구성능을 갖도록 요구되어진다.

이러한 추세에 따라 본 연구에서는 촉매변환기에서 발생하는 여러 가지 문제유형인 매트침식, 이물질유입, 용융 및 크랙, 소음문제등 중에서 상대적으로 그 발생 비율이 높고, 촉매변환기 자체의 개선으로 그 개선효과를 충분히 얻을 수 있는 매트침식에 의한 촉매장치 결함을 중점적으로 검토하여 개선점을 강구하였다. 매트침식의 여러 가지 형태를 기초로 하여 추정된 결함원인에 대

* 정회원, 현대자동차(주) 수출정비교육부 과장

한 확인시험을 실시하였다. 이러한 확인을 거친 사항에 대하여 구성부품 요소 별로 개선을 도모하여 테스트 벤치에서의 열악한 조건에서도 강화된 배기규제를 만족하는 것이 가능한 것으로 확인되었다.

2. 촉매변환기의 구조 및 성능특성

2.1 촉매변환기의 매트침식에 의한 결함 특성

Fig1.은 자동차에 적용되고 있는 촉매변환기의 구조를 나타낸 것으로 담체와 셀 사이의 주어진 반경방향 틈새 내에 주어진 세라믹 매트 지지밀도에 의해 담체를 지지하는 촉매장치 구조와 진동이 수반되는 고온, 고압의 배기계에 장착되는 사용 조건을 고려할 때, 기계적 및 열적 성능을 만족하고, 배기규제를 충족하는 구조적 특성을 가지고 있어야 한다.

촉매변환기의 결함중 매트침식에 의한 결함은 Fig.2와 같은 형상으로 문제가 발생되며, 계속 진행되면 매트가 완전히 침식되어 소멸됨과 동시에 담체가 마멸되어 조각으로 된다.

2.2 촉매변환기 지지압력

차량의 배기계에 설치되어 있는 촉매변환기의 담체를 지지해 주는 매트의 최소 지지압력 (Mounting Pressure)은 배기계의 배압과 진동 가속력 이상이어야 한다.

계산상의 편의를 위하여 실제로는 타원형이지만 원형으로 간주하여 Fig.3에서 지지 압력조건을 구하면

$$F_r > F_{bp} + F_v \tag{1}$$

여기서 F_r 는 매트와 담체면에서의 마찰력, F_{bp} 는 배압에 의해 담체 입구면에 미치는 힘, F_v 는 진동력이다.

또한 식 1.의 각각의 힘들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_r = \mu P_m A_c \tag{2}$$

여기서 μ 는 매트면과 담체면의 마찰계수, P_m

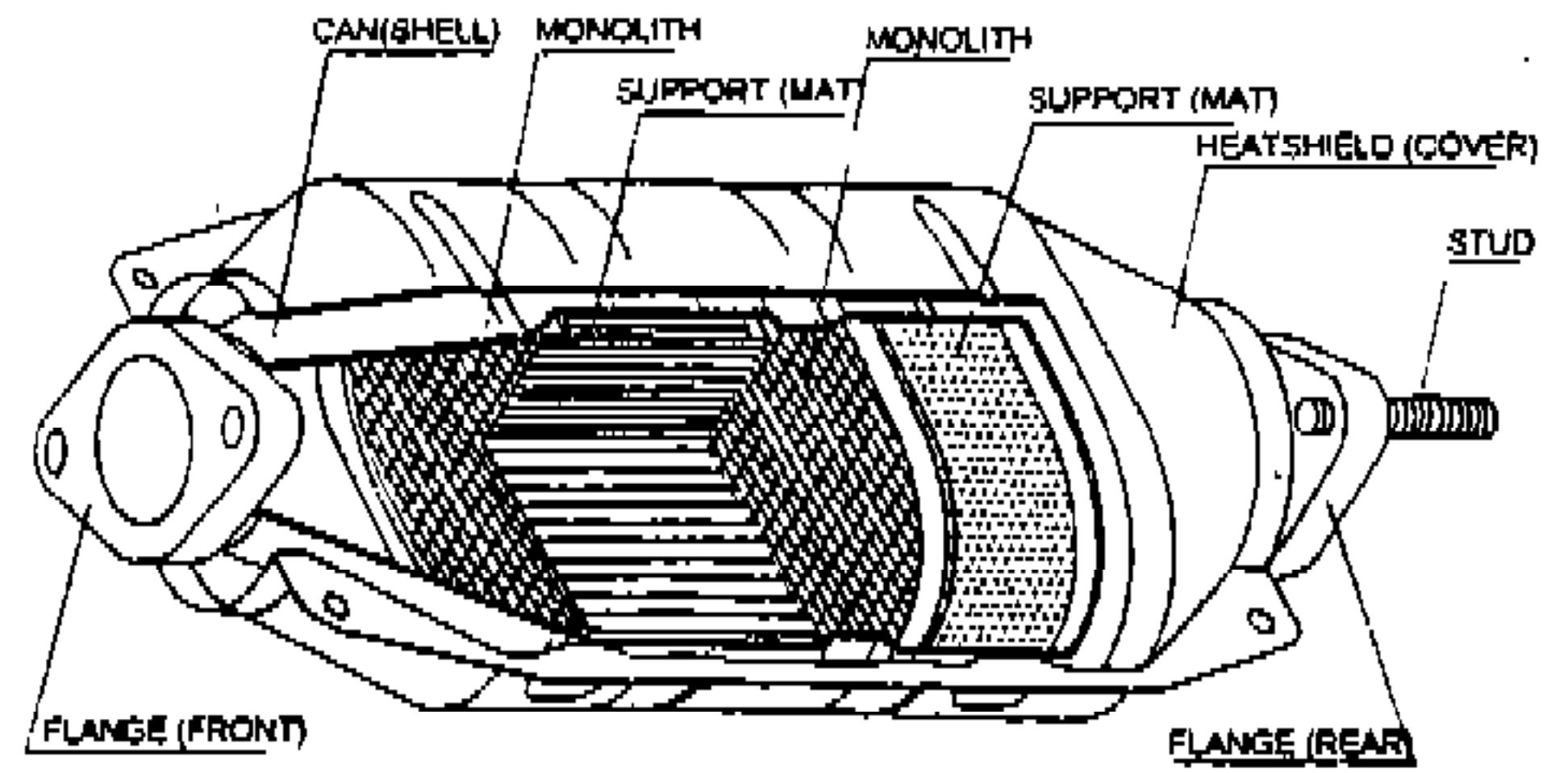


Fig.1 Structure of the Current Catalytic Converter

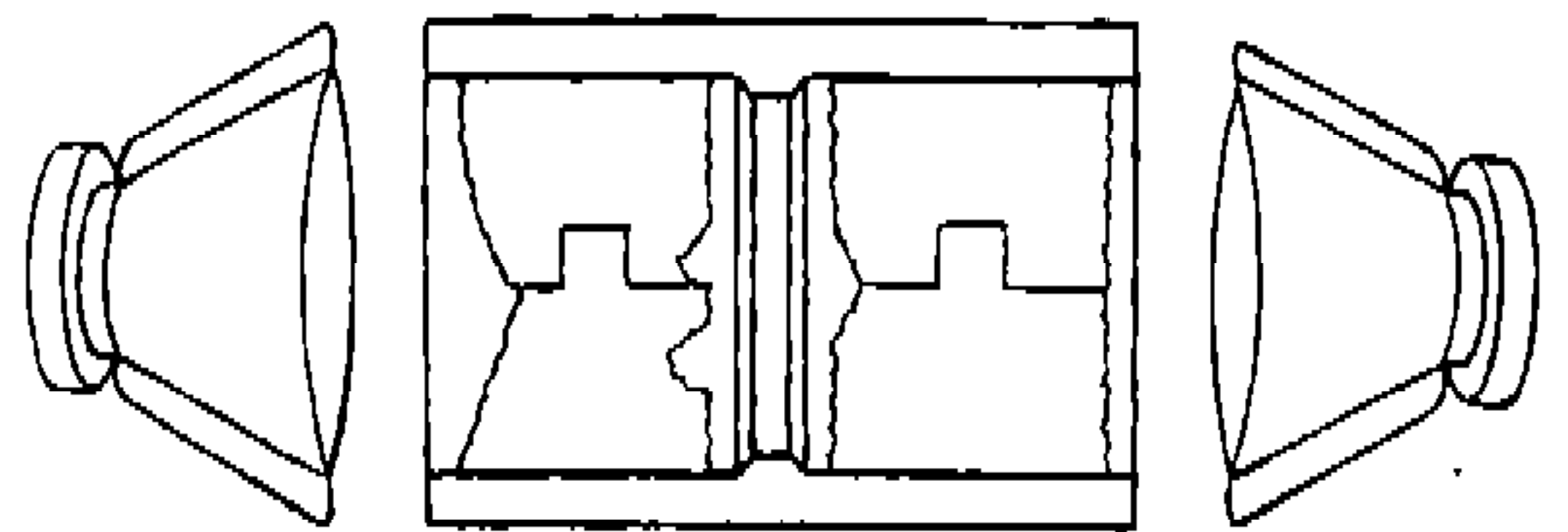


Fig.2 Mat Erosion of Catalytic Converter

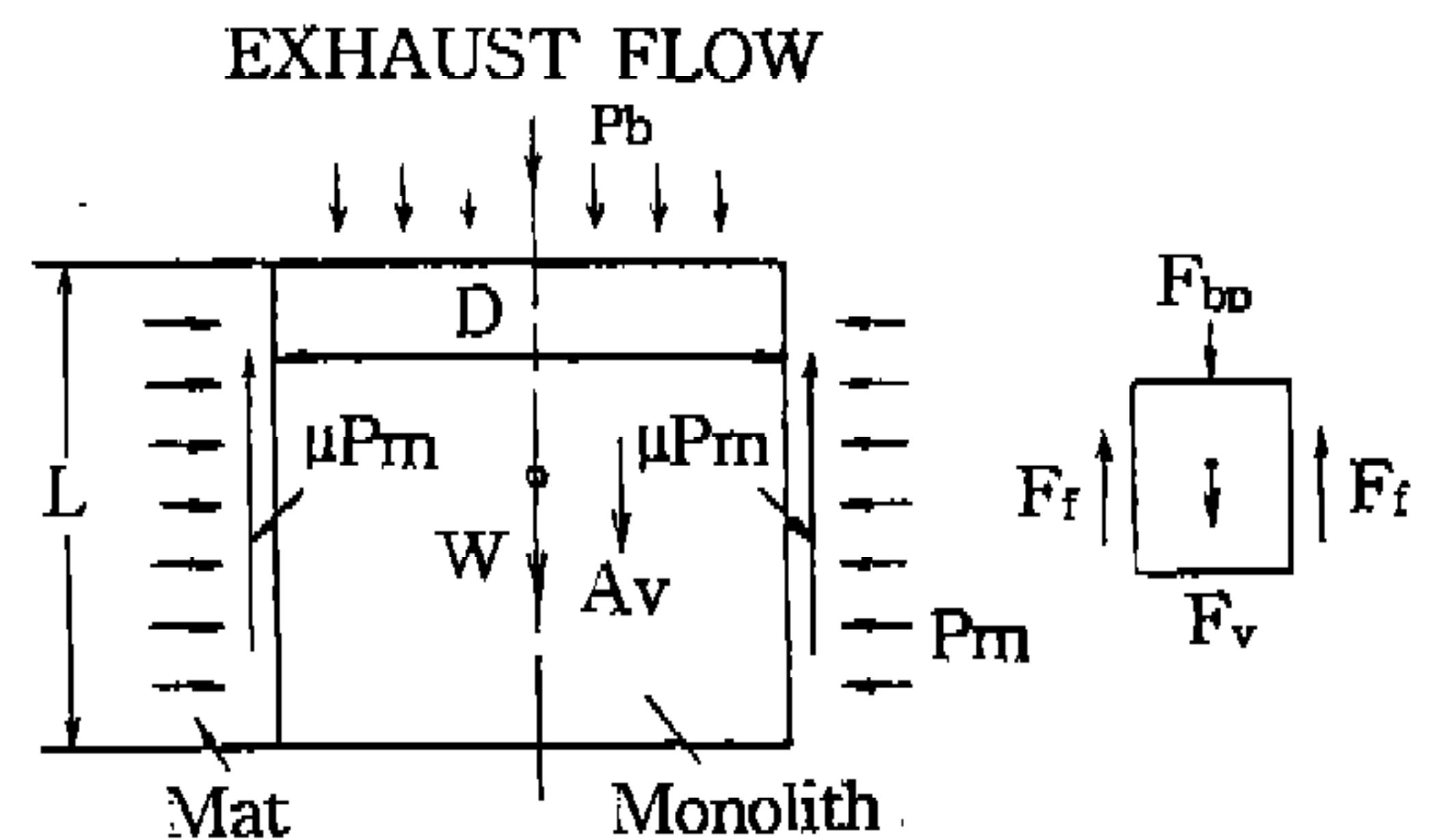


Fig.3 Mechanical Loads Acting on Monolith

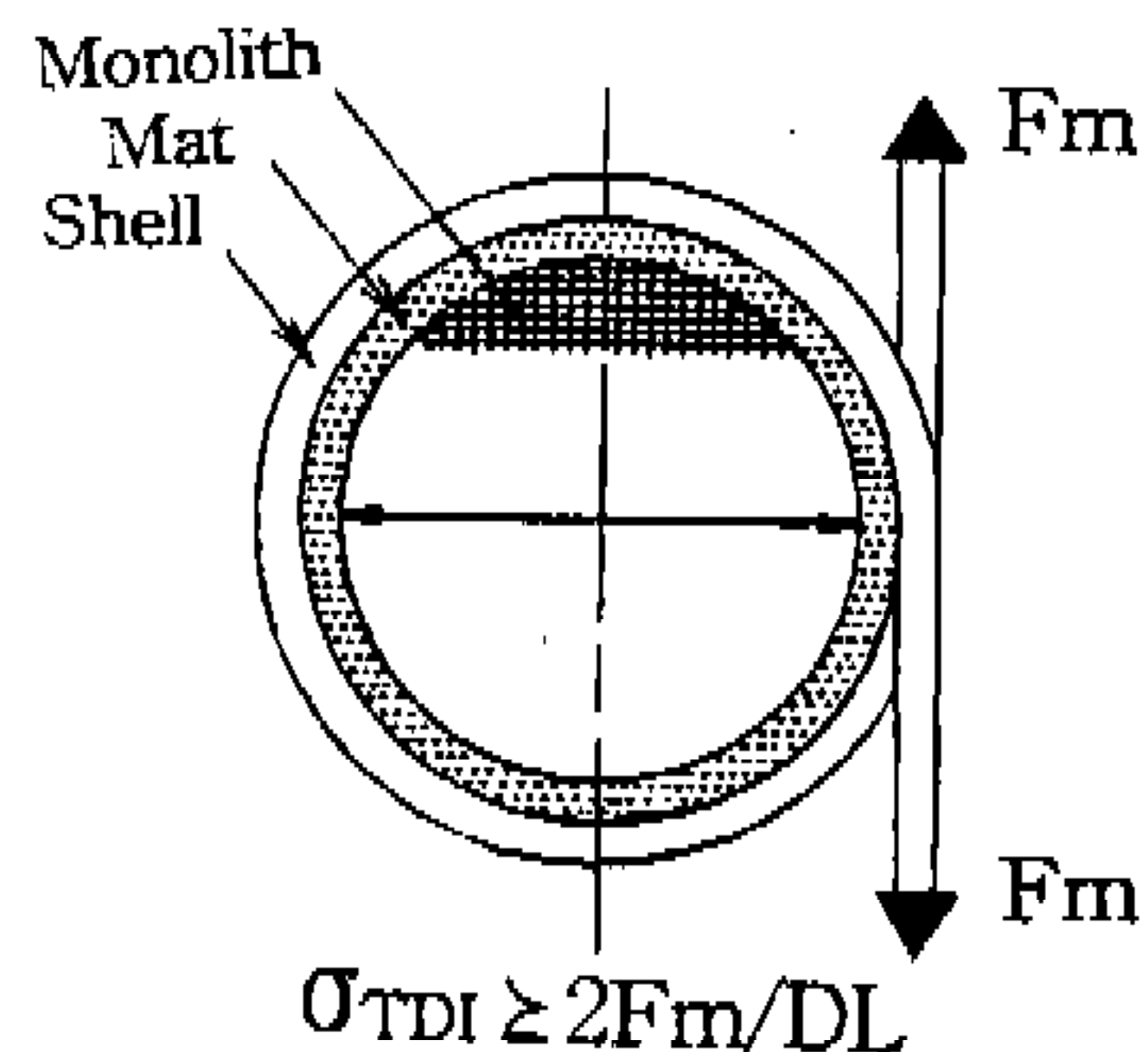


Fig.4 Schematic Diagram of Two Dimensional Isostatic Strength Measurement

는 매트에 작용되는 지지압력, A_c 는 매트와 담체사이의 접촉면이다.

$$F_{bp} = P_b \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3)$$

여기서 P_b 는 배압, D 는 원형담체의 직경이다.

$$F_v = W \times \frac{A_v}{g} \quad (4)$$

여기서 W 는 담체의 무게, A_v 는 W 방향의 진동가속력, g 는 중력가속도이다.

매트에 의하여 담체표면의 전체가 감싸진다고 가정하면 식 2.에서 $A_c = \pi DL$ 로 되고 식 2.~4.를 식 1.에 대입하면 다음관계가 성립된다.

$$P_m > \frac{D}{4\mu} \left[\frac{P_b}{L} + \frac{\rho_c A_v}{g} \right] \quad (5)$$

여기서 ρ_c 는 코팅된 담체의 밀도, L 은 담체의 길이, μ 는 마찰계수로서 0.25⁵⁾이다. 따라서 담체가 미끄러지지 않게 하기 위한 지지압력의 최소값은 다음 식으로 표시된다.

$$P_m(\min) = D \left[\frac{P_b}{L} + \frac{\rho_c A_v}{g} \right] \quad (6)$$

담체가 지탱할 수 있는 최대지지압력은 2차원 등적강도(Two Dimensional Isostatic Strength, TDI)로 나타낼 수 있고 Fig.6에서 담체파손하중은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\sigma_{TDI} \geq 2 F_m / DL \quad (7)$$

이 TDI 기술은 클램셸 캔(Clamshell Can)으로 캐닝을 하든 심리스 캔(Seamless Can)으로 캐닝을 하든지 간에 캐닝시에 담체가 파손되지 않는 캐닝 압력을 예측하는데 있어서 중요한 기술이 된다. 그런데 400/6.5 담체 구조의 최소 TDI값은 코팅하지 않았을 때의 값으로 39kg/cm²를 얻을 수 있다³⁾. 여기서 코팅을 하였을 때 강

도가 25~35% 개선된다고 하였을 때 최소 TDI 값은 56kg/cm²이 되고 고속 캐닝속도를 고려한 안전계수 2를 고려하면 최대지지압력은 28kg/cm²를 초과하여서는 안된다.

2.3 세라믹 매트와 압축 특성

담체를 지지해주는 역할을 하는 서포트(Support)는 단열성, 고온장착성능, 가스실링성, 소음차단특성, 조립성 등이 우수한 세라믹 매트를 적용하였다. 매트의 상온에서의 압축특성은 Fig. 5로 나타나며, 평균지지압력 P_m (kg/cm²)과 매트 밀도 ρ_m (GBD : Gap Bulk Density, g/cm³)을 다항식으로 나타내면 식 (8)과 같이된다.

$$P_m = 2\rho_m^6 + 17.6\rho_m^4 + 15.6\rho_m^2 + 3.2 \quad (8)$$

실제 매트지지시의 ρ_m 은 다음과 같다.

$$\rho_m = W_m / t_m \quad (9)$$

여기서 W_m 은 매트의 기준무게(g/cm³), t_m 은 매트 두께(cm)이다.

경험에 의한 GBD범위는 다음과 같이 정하여 지며,

$$0.78 \leq \rho_m \leq 1.2 \quad (10)$$

이를 식 (8)에 대입하면 평균지지압력의 범위는 다음과 같다.

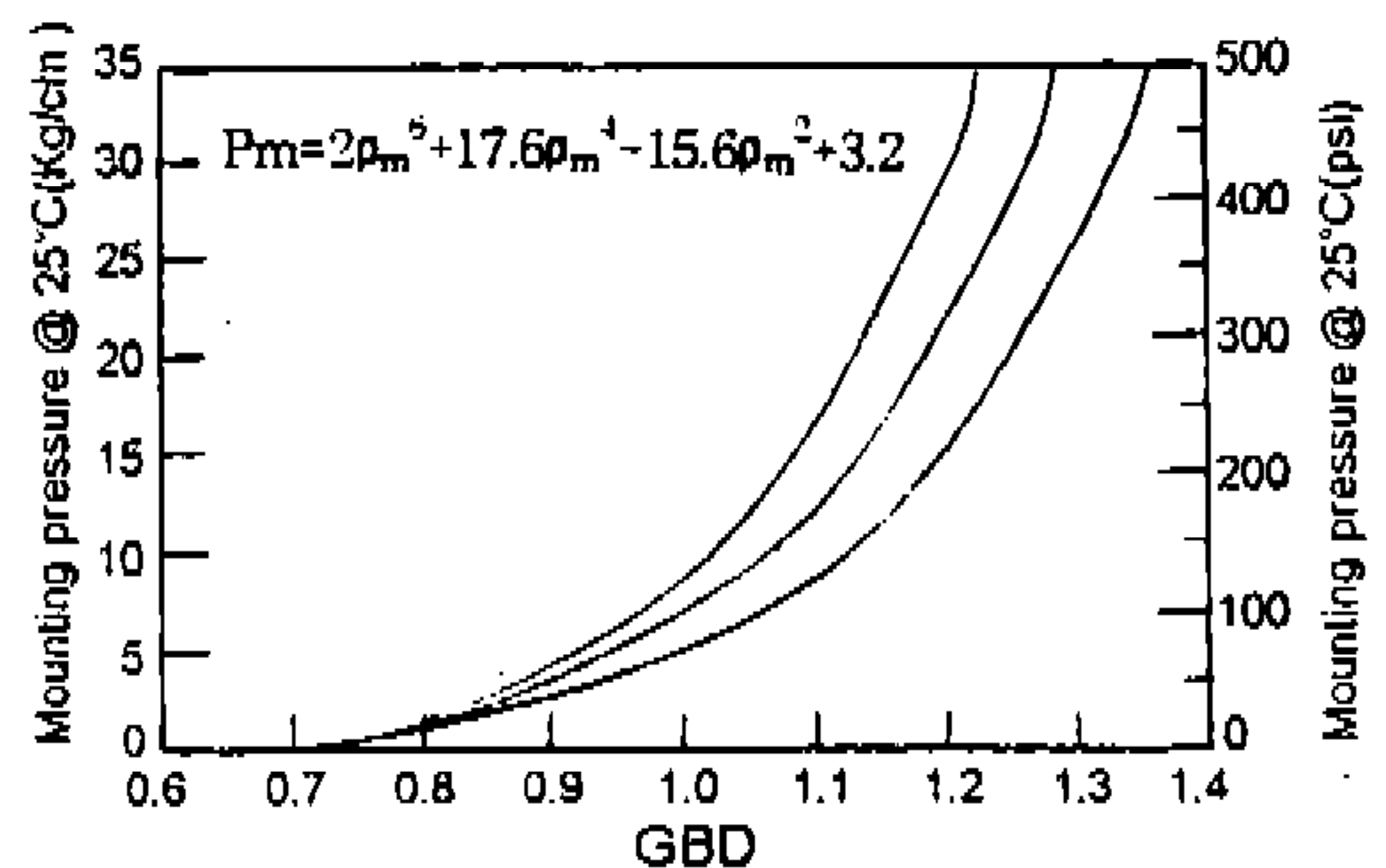


Fig.5 Dependence of Mounting Pressure on Gap Bulk Density for Intumescent Mat (20°C)

$$0.67 \leq P_m \leq 23 \quad (11)$$

대부분의 적용에 있어서 최소압력은 0.5kg/cm² 정도이고, 최대압력은 30kg/cm² 정도이다. 특히 최소지지압력의 경우는 Fig. 6, 7와 같은 매트 열팽창특성을 고려하여야 한다.

또한 Fig.8에 나타난 바와 같이 매트는 온도 상승에 따라 팽창에 의해 GBD가 크게 상승하기 때문에 이것을 고려하여 최대 압력을 구하여야 한다.

2.4 세라믹 매트와 고온침식저항

고온의 배기가스 흐름에 직접 노출되어 있는

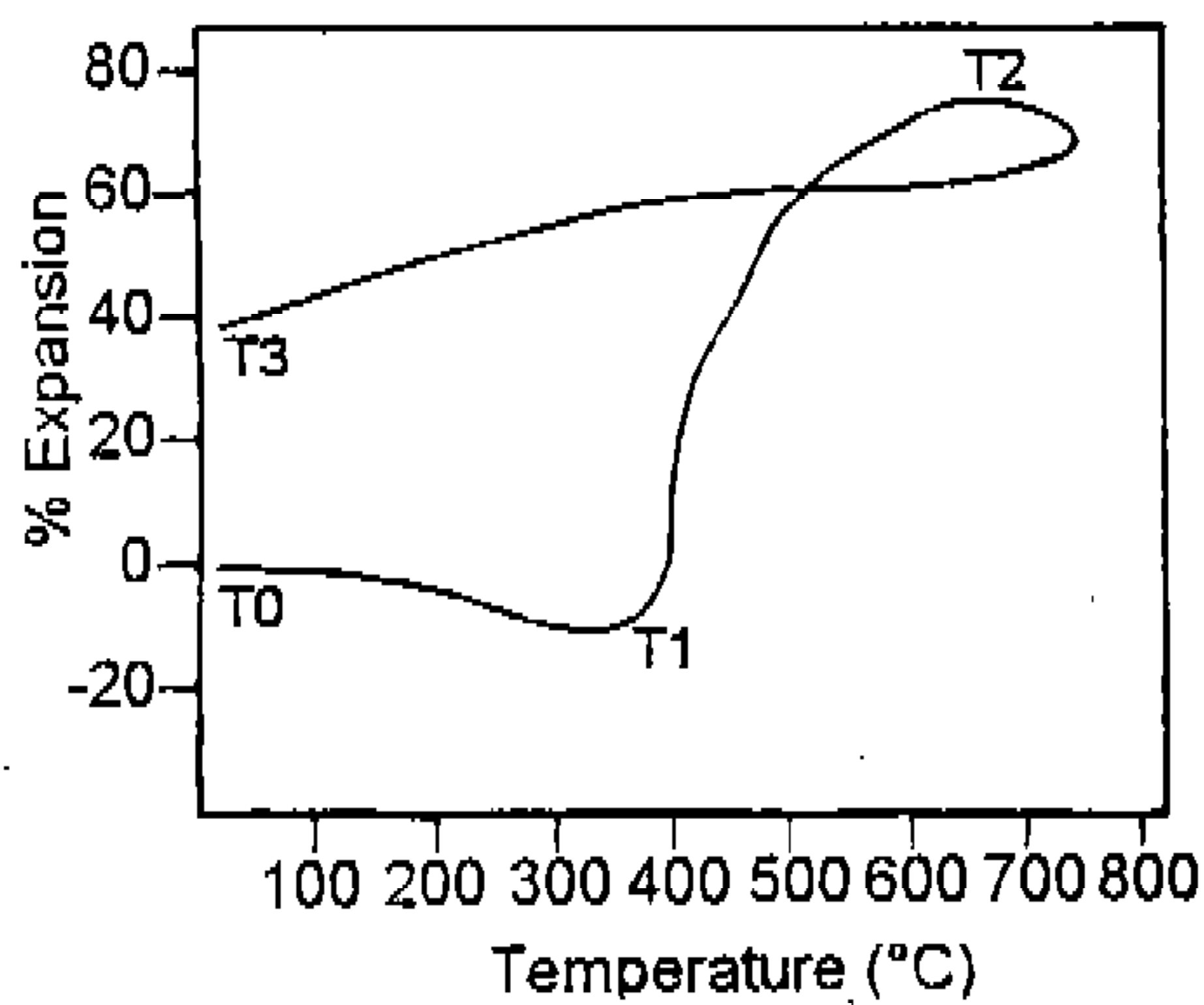


Fig.6 Mat Thermal Expansion Behavior under 345kpa

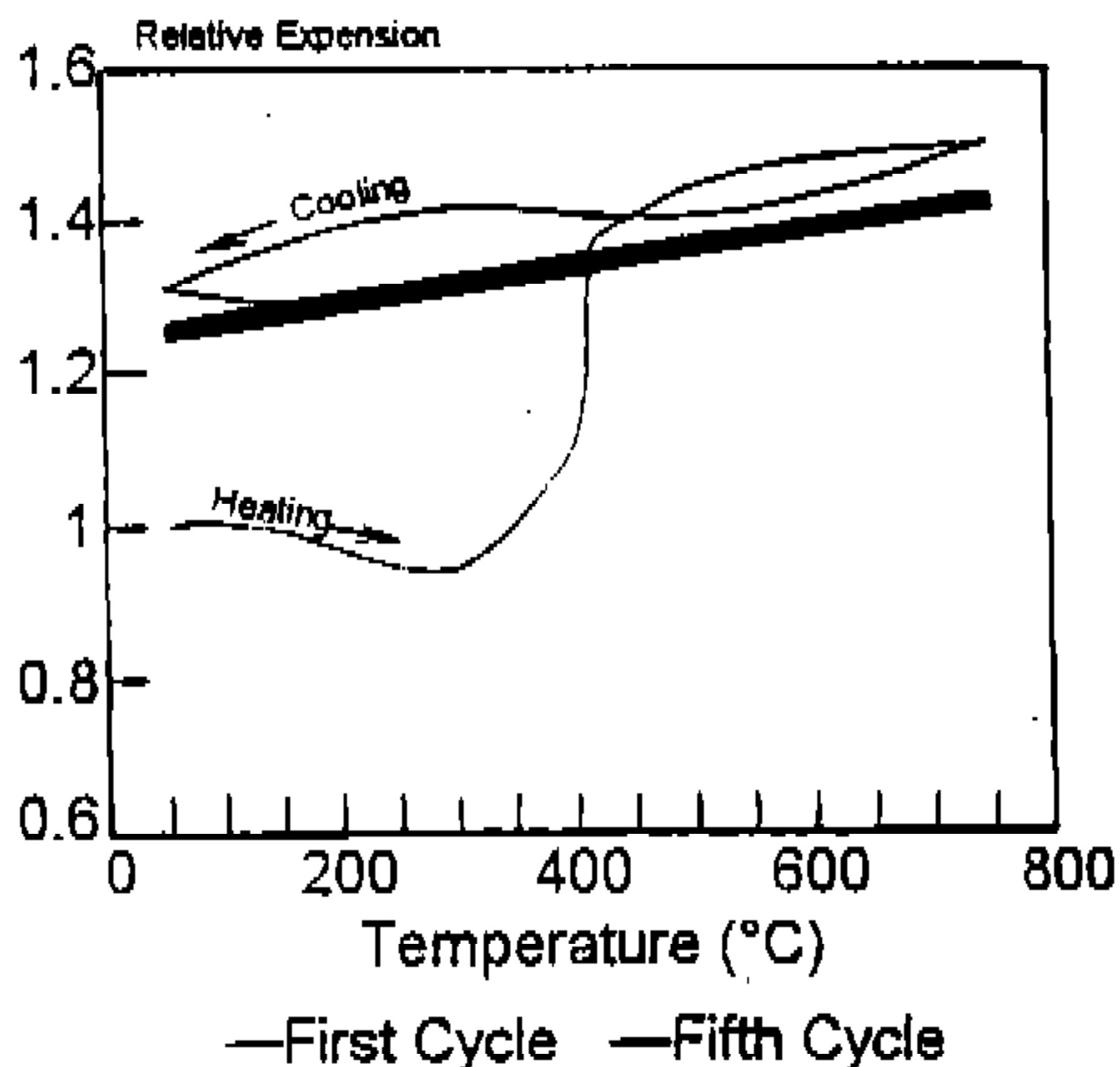


Fig.7 50 Cycle Thermal Expansion of Mat

매트 선단부의 세라믹 파이버(Ceramic Fiber)와 버미큘라이트 입자(Vermiculite Particle)는 결합제가 소멸됨에 따라 침식되고 이것은 촉매내구특성의 요인이 된다. Fig. 9, 10의 열간 및 냉간시의 가속침식시험결과를 볼 때 GBD가 높으면 높을수록 매트침식내구성이 기하급수적으로 증가됨을 알 수 있다.

3. 매트침식에 미치는 인자

3.1 구성부품의 영향

3.1.1 공차의 영향

먼저 공차를 기초로 Fig.11에 표시된 타원형 담체에서 실제 매트침식 문제의 중요지점인 단축부위를 기준으로 하여 계산하면 셀의 치수공차 45.5±0.35 및 매트 공차 ±8%를 고려하면

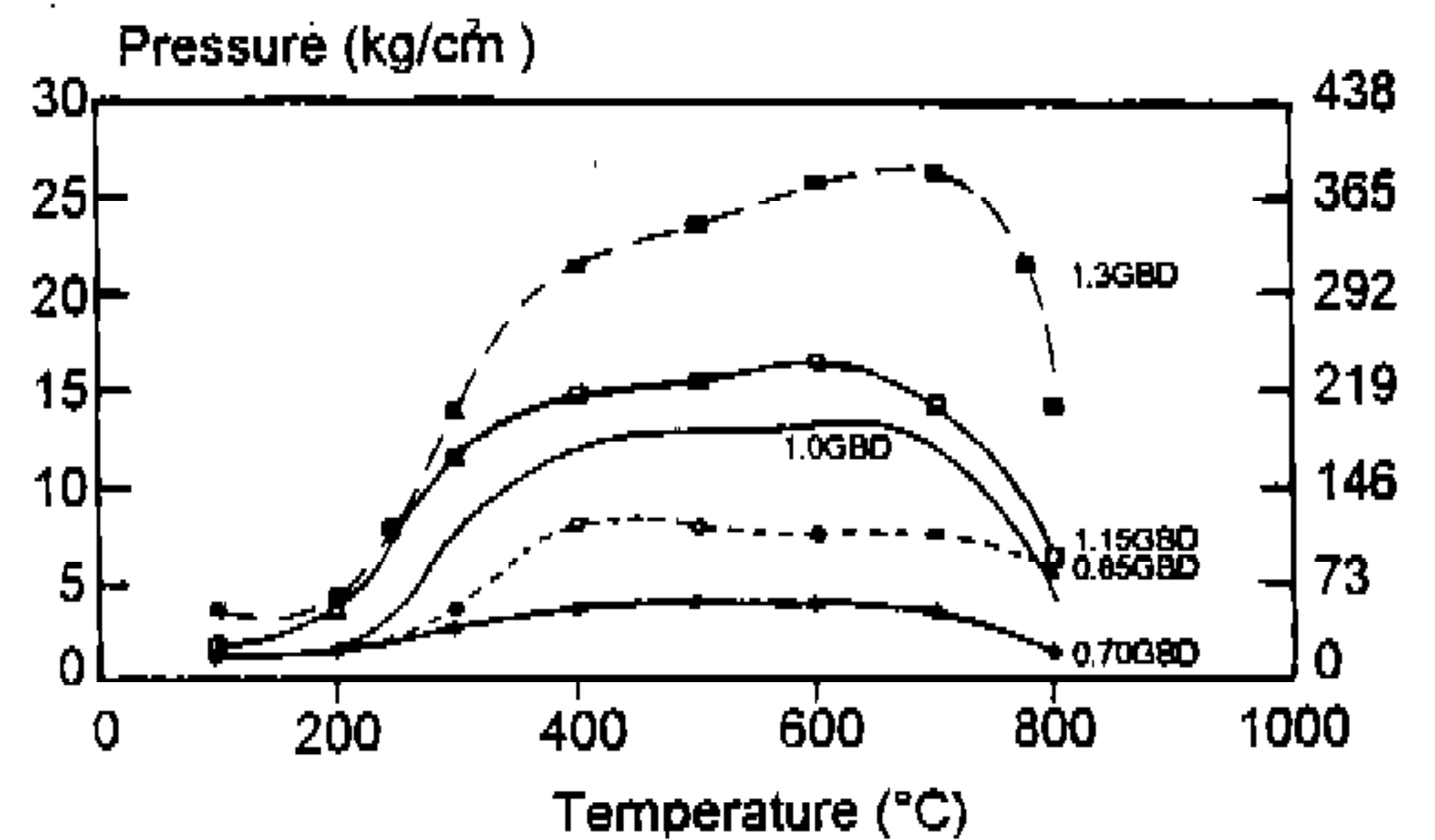


Fig.8 Pressure vs. Temperature at Various Gap Bulk Densities(GBD)

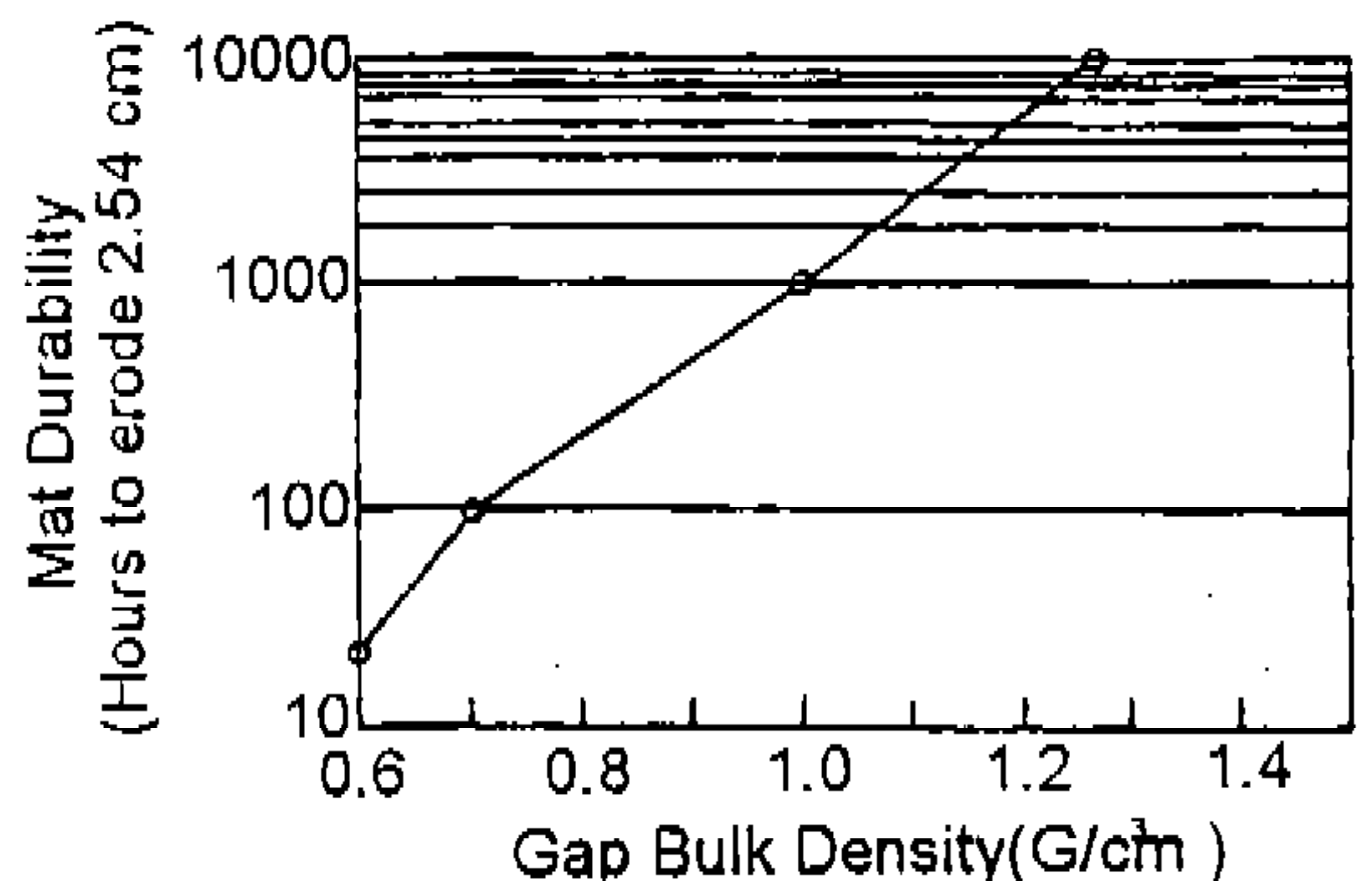


Fig.9 Erosion Resistance vs GBD with Accelerated Hot Erosion Test

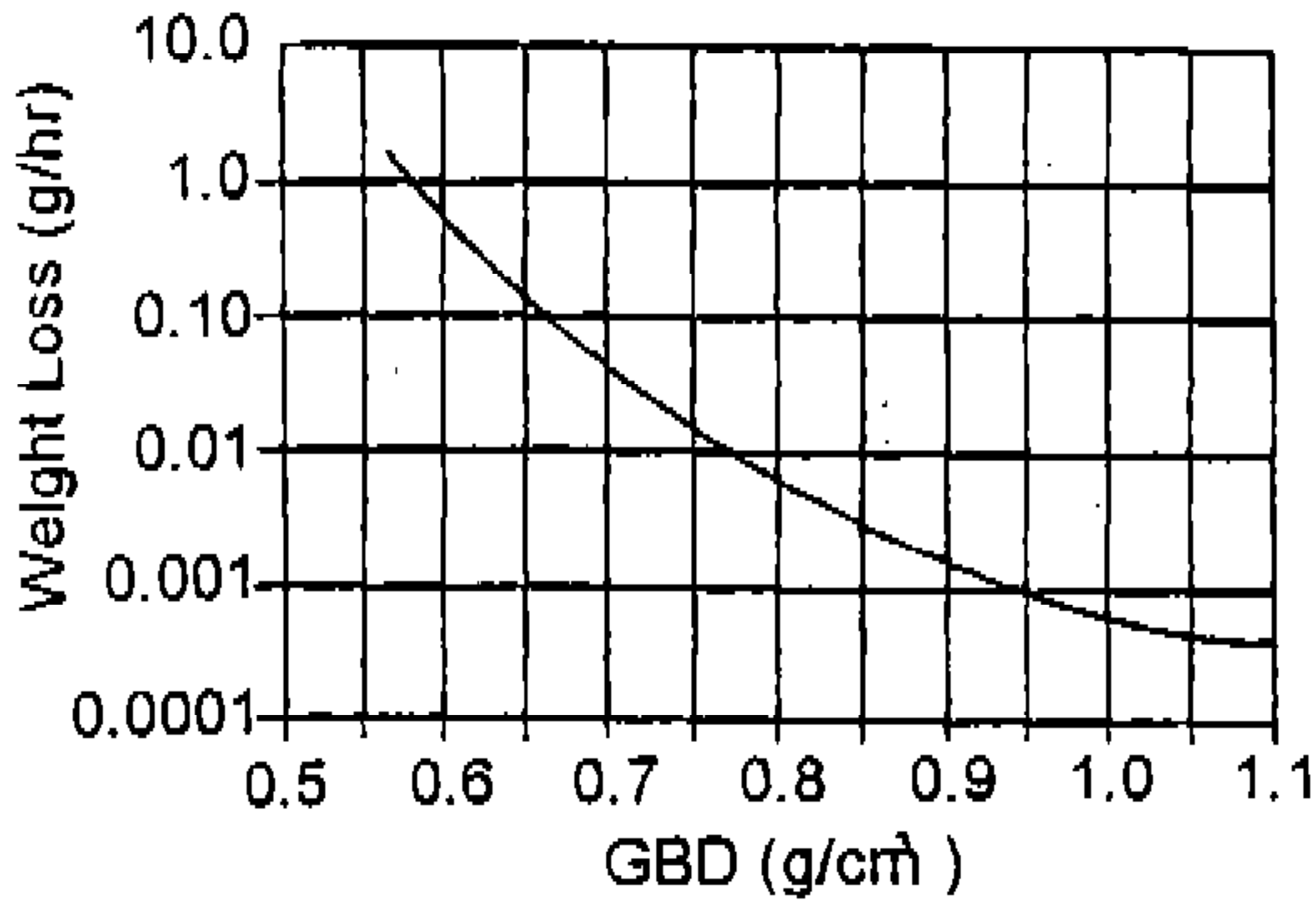


Fig.10 Erosion Resistance vs GBD with Accelerated Cold Erosion Test

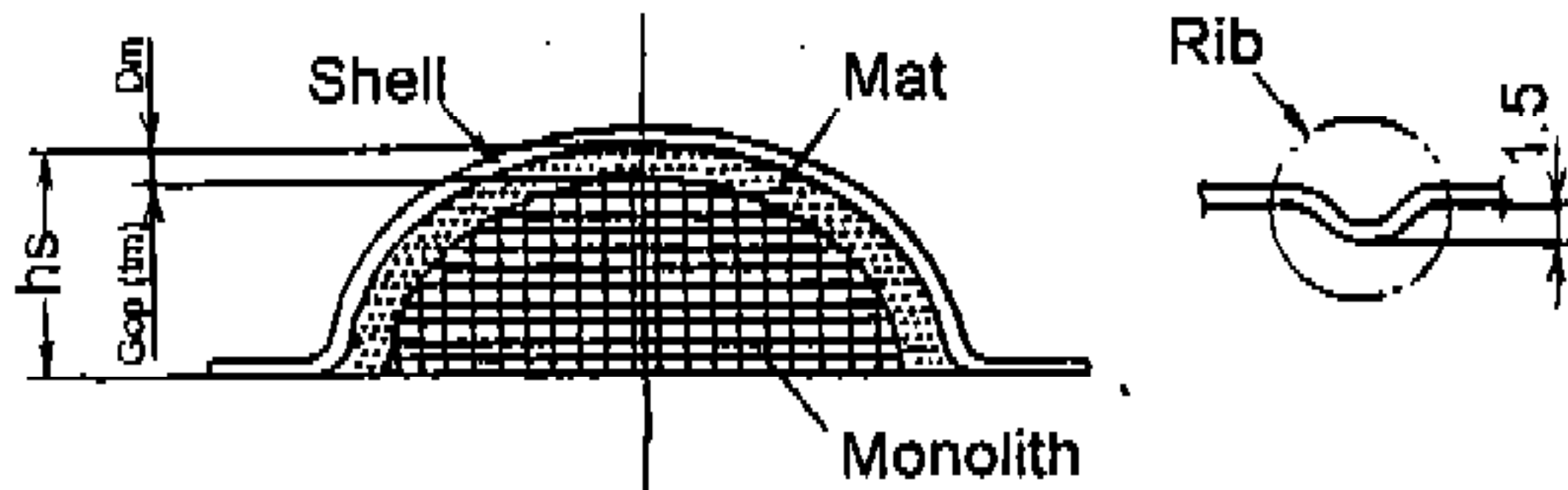


Fig.11 Sectional View of Catalytic Converter

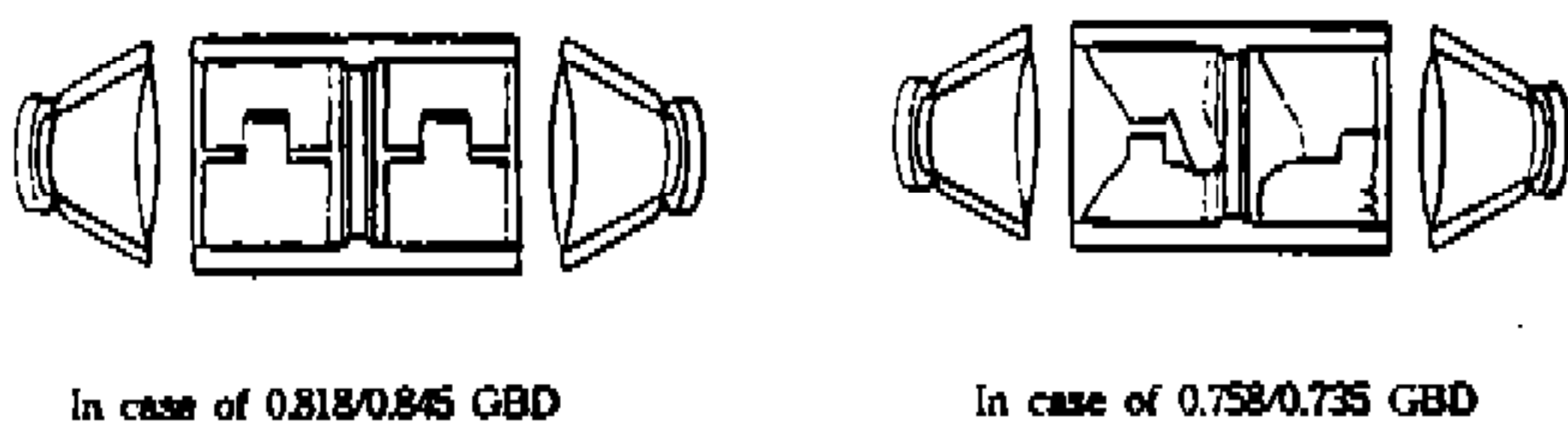


Fig.12 The Effect of Mat Erosion Between Two GBD

GBD는 공칭 0.886이며, 최대 1.557, 최저 0.627이 된다. 또한 리브(Rib) 부위는 공칭 1.550이며, 최대 22.320, 최저 0.839가 된다.

공차가 미치는 영향을 확인하기 위하여 GBD가 설계치에 가까운 0.818/0.845(앞/뒤 촉매)와 0.758/0.735(앞/뒤 촉매)인 시편으로 촉매 입구온도 900°C 15시간으로 테스트 벤치로 비교한 결과, 각각의 경우 매트침식의 형태는 Fig.12과 같다.

Fig.20에서 GBD가 낮은 시편이 높은 시편에 비하여 매트 침식이 빨리 일어남을 확인할 수 있다. 또한 이는 담체의 형상이 국부적으로 변형되어 표준치수보다 적은 형상을 가질 경우 국부적

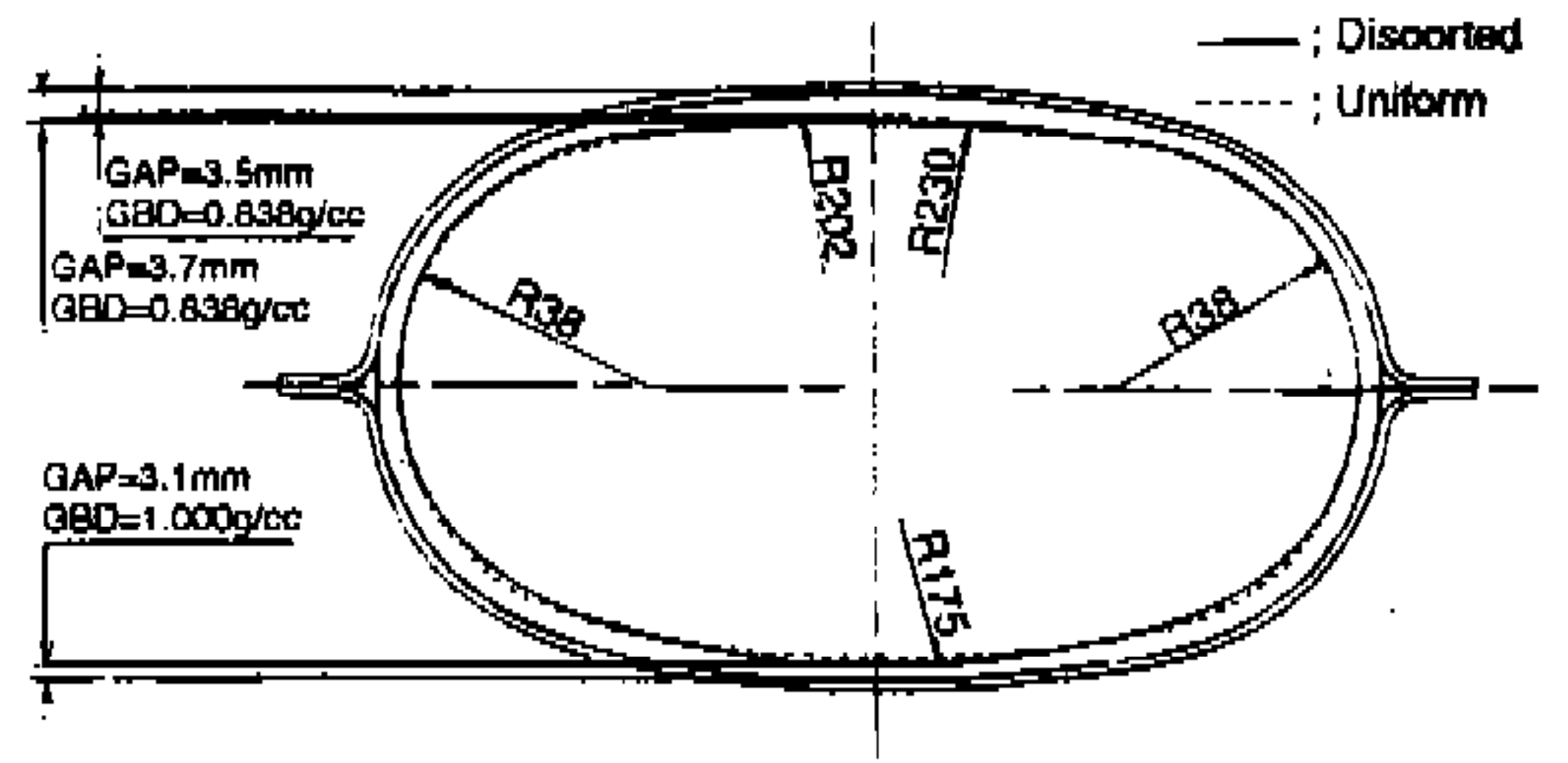


Fig.13 GBD Difference by Monolith Distortion

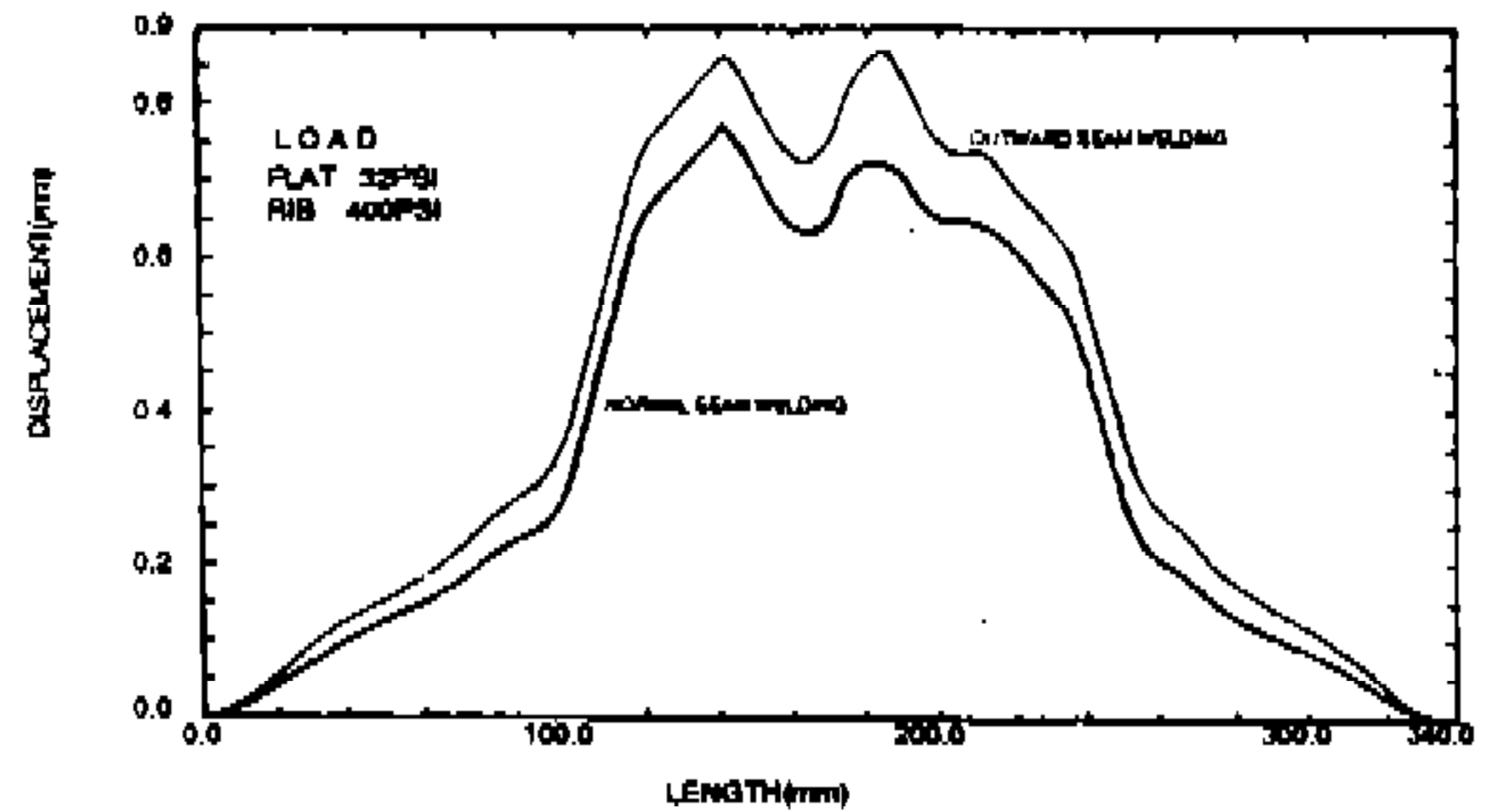


Fig.14 Shell Displacement by welding position

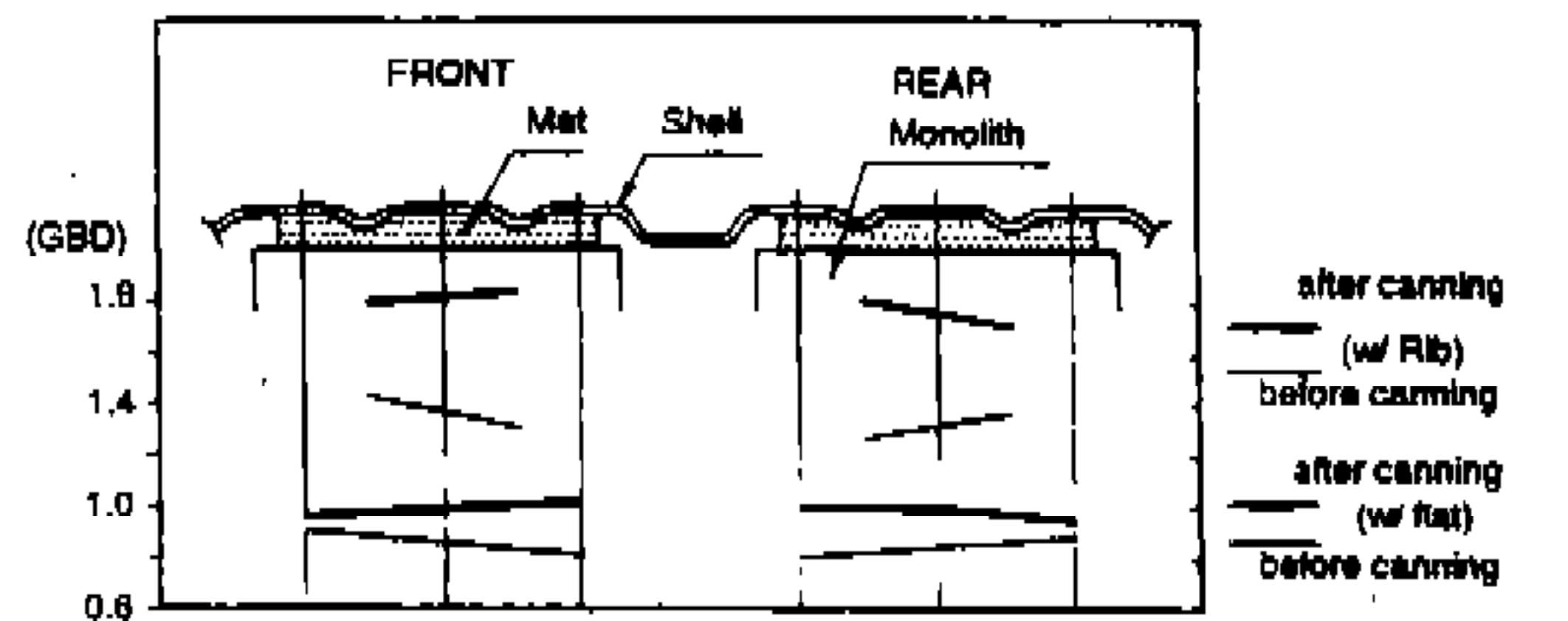


Fig.15 GBD Comparison Shell Deformation after canning

으로 GBD가 저하되어 매트 침식을 가속화 할 수 있음을 동시에 나타낼 수 있음을 보여준다.

3.1.2 담체 형상

담체의 제조과정에서 담체자중에 의하여 타원 형상이 국부적으로 변형되며, 이로 인하여 Fig.13와 같이 GBD는 변경된다.

3.1.3 셀 용접 위치

캐닝시 상하의 셀을 씨임(Seam) 용접할 때, 용접위치에 따라 최대 3~6mm 편차가 발생하며, 5mm 편차 발생시 기계적 하중만을 고려하여 CAEDS로 시뮬레이션하여 보면 Fig.14과 같이 되며, 이는 정상보다 0.1mm셀이 더 늘어나는 효과를 나타내며 이는 GBD 0.861로서 0.025의

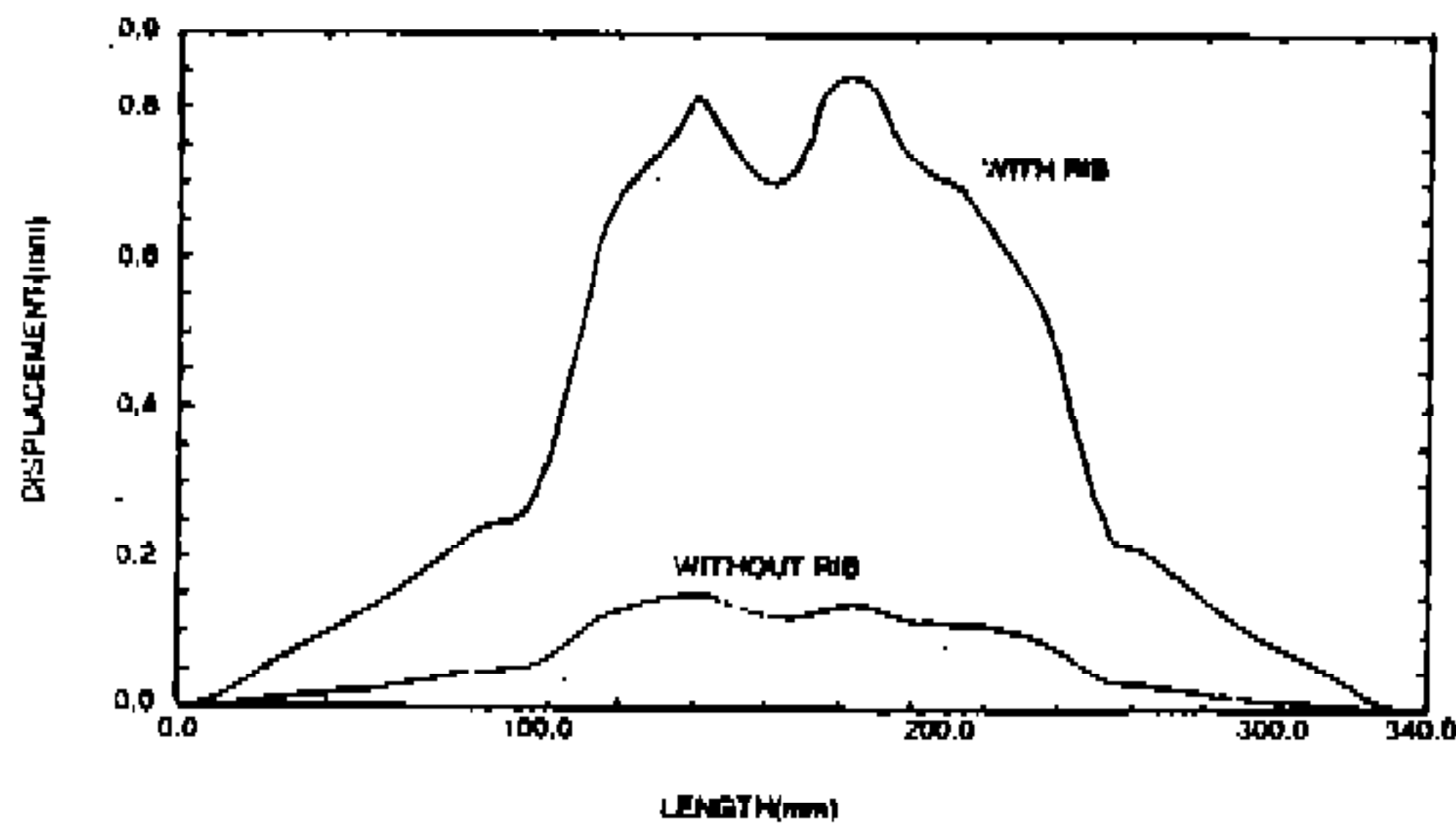


Fig.16 Between before Canning and after Canning

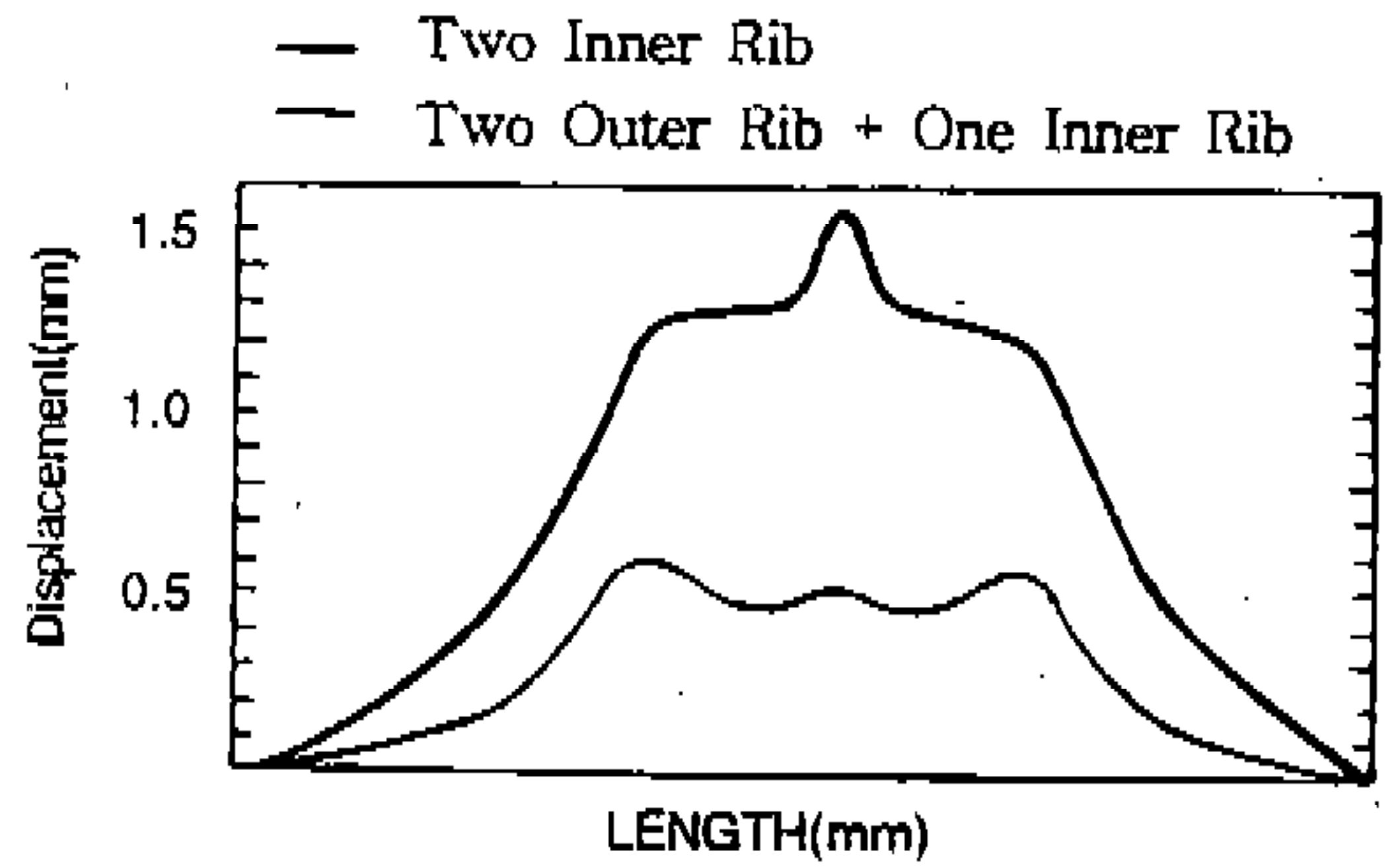


Fig.17 Comparison of Two Cases' Rib

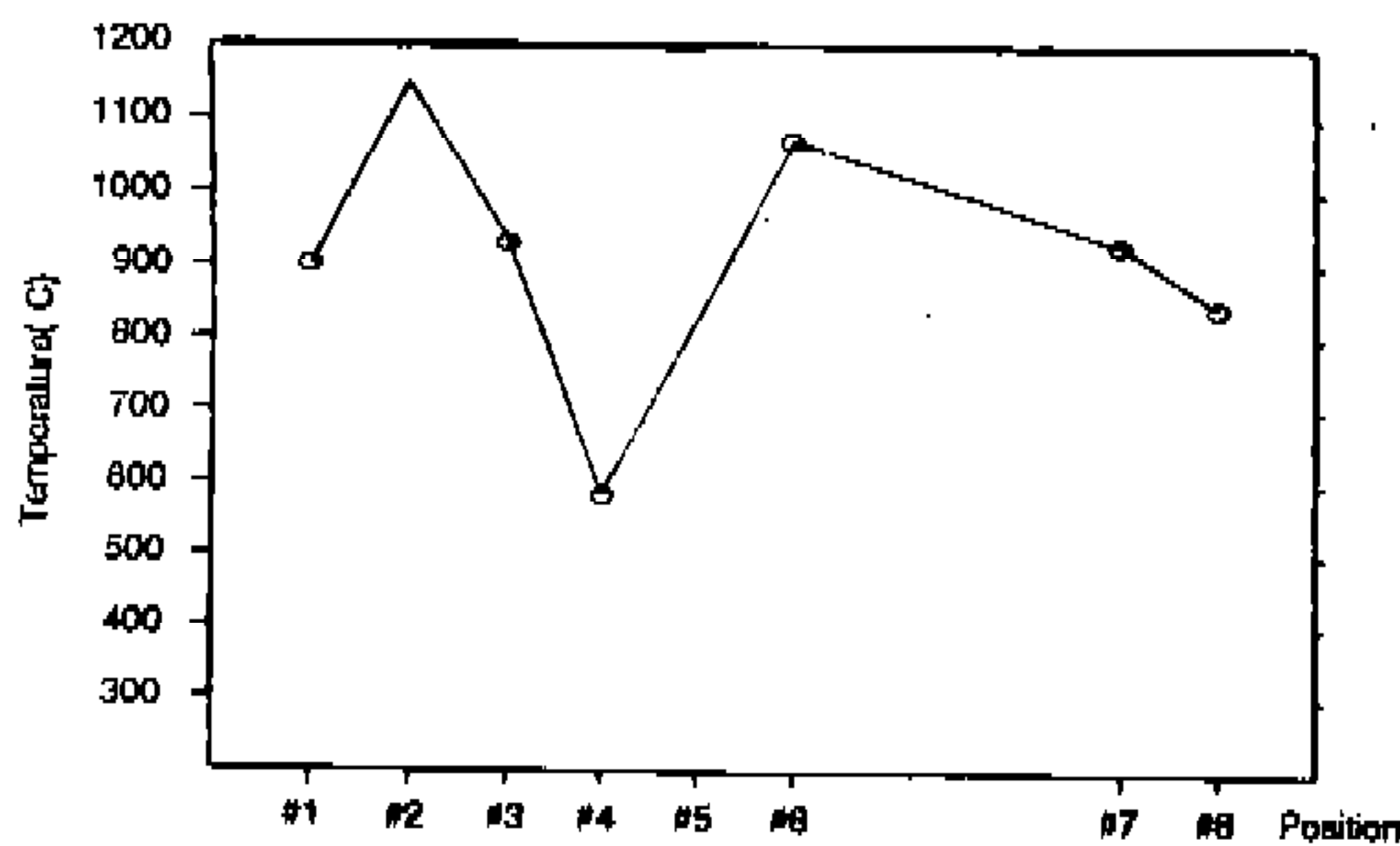
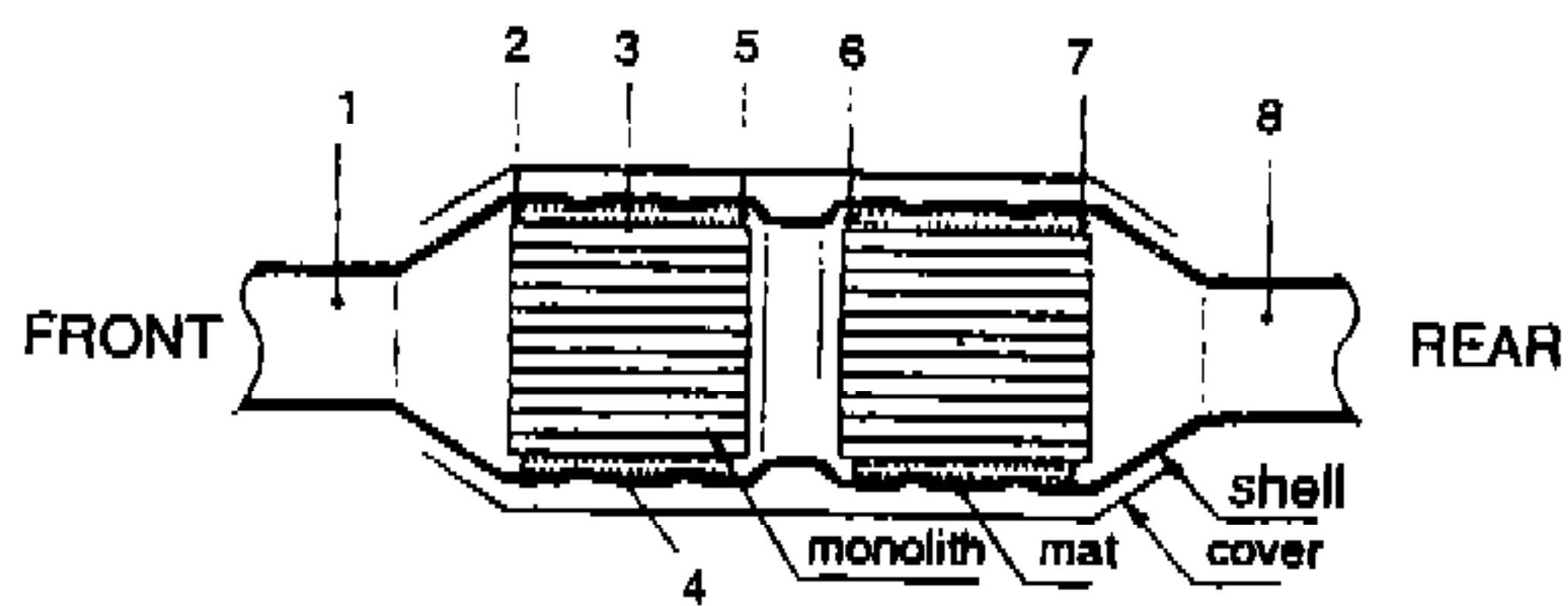


Fig.18 Shell Deformation and Temperatures of Converter during Bench Dynamo Test

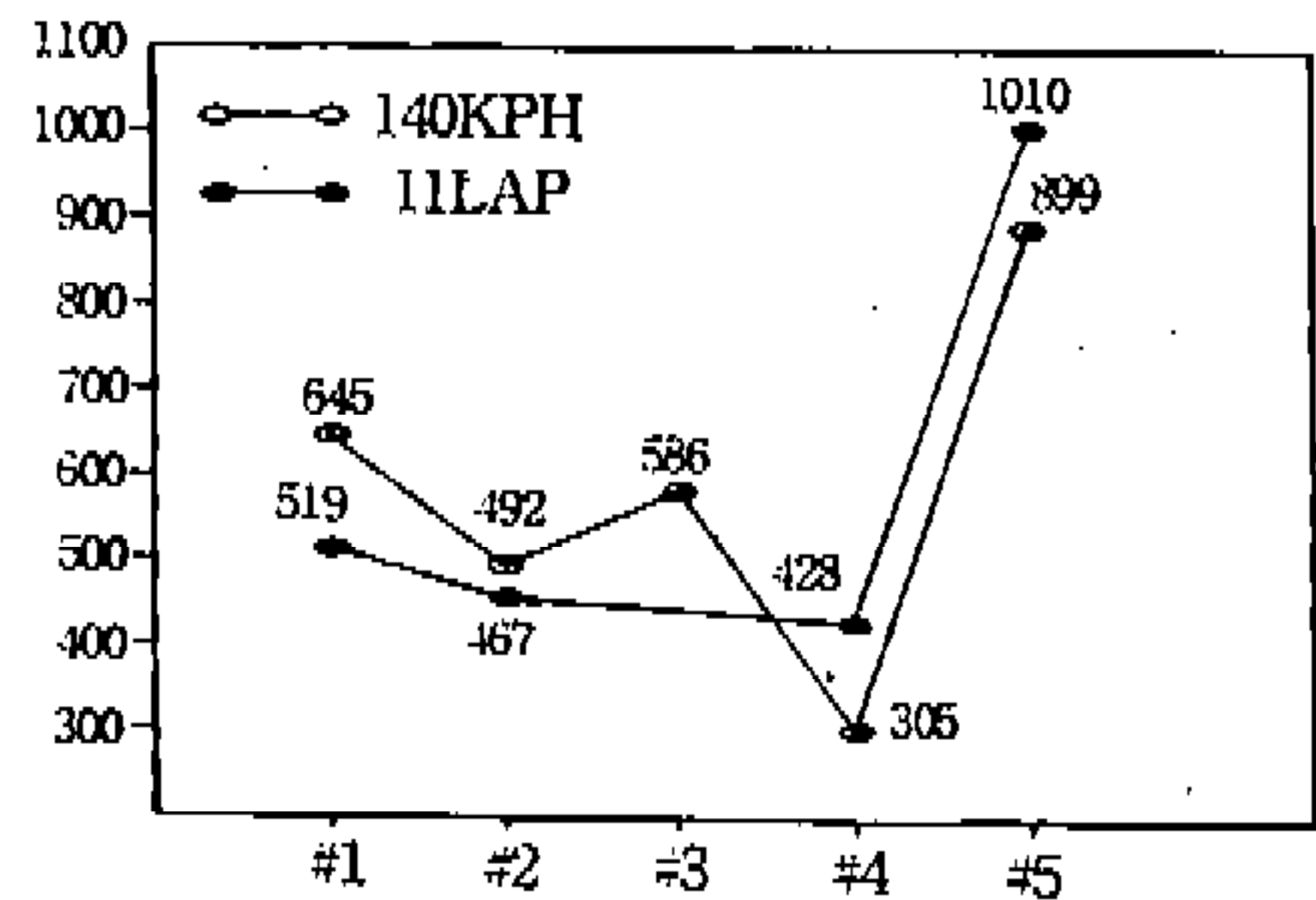
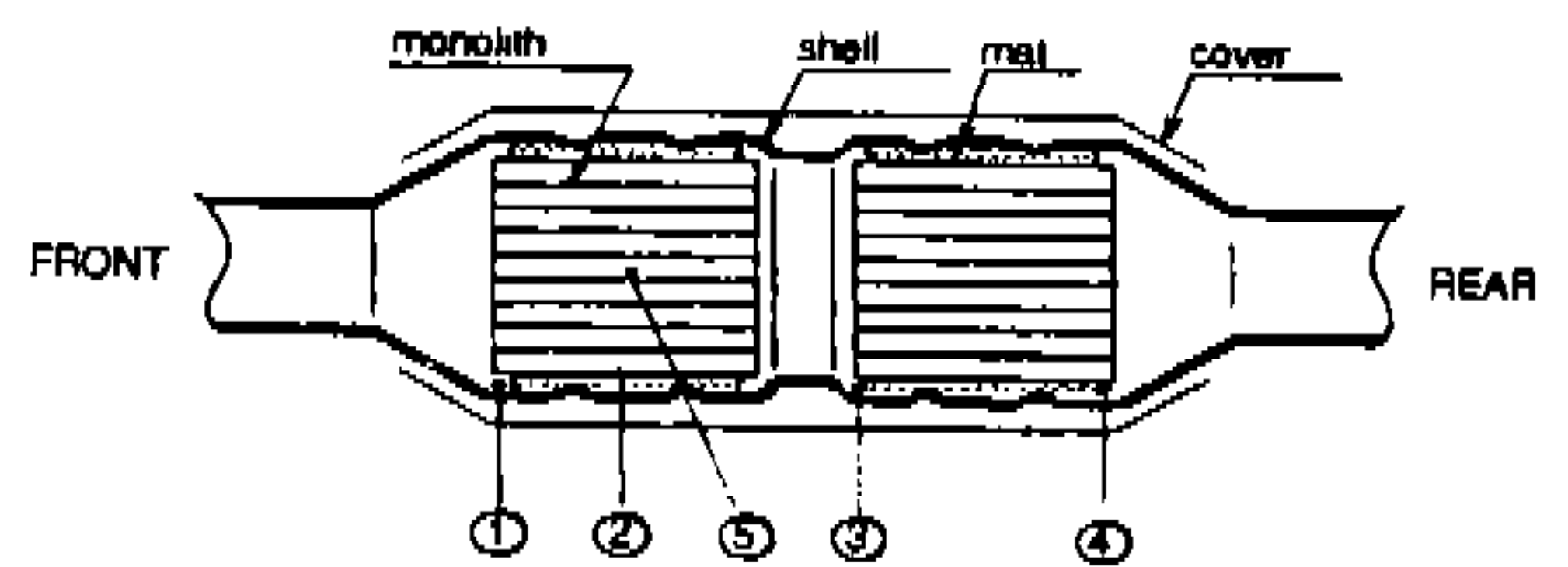


Fig.19 Temperature of Converter during driving Vehicle

차이가 발생된다.

3.1.4 캐닝시 부풀어오름

캐닝 전후의 GBD의 변화량을 측정된 결과 Fig.15와 같으며, 이를 CAEDS로 Simulation한 결과 Fig.16과 같이 동일한 결과가 도출되었으며 특히 보강 리브(Rib)가 있는 경우 부풀어오름이 큰 것으로 나타났다.

캐닝시 담체에 대한 지지압력을 유지하기 위하여 매트 두께는 이론적인 셀과 담체사이의 간격보다 두꺼우며, 이에 의하여 캐닝 후 셀은 매트에 의한 반작용으로 부풀어오른다. 특히 셀의 열에 의한 변형을 줄여주며, 매트의 고온에서의

지지압력을 강화시켜 주기 위하여 셀표면에 보강 리브(Rib)를 설치할 경우 리브형상에 따라 캐닝시 담체에 가해지는 하중이 변화한다. 안쪽 방향 리브의 경우 캐닝시 리브 부위에 집중하중이 가해지며, 바깥방향 리브의 경우 열에 의한 변형은 흡수할 수 있으나 매트의 지지압력은 증대시켜주지 못한다. 따라서 리브의 형상을 적절히 적용할 경우 캐닝시 부풀어오름도 줄이면서, 열에 의한 변형을 흡수할 수도 있을 것으로 고려된다. 리브형상이 다른 두가지 경우, 캐닝시 셀의 부풀어오름을 CAEDS로서 Simulation한 결과 Fig.17과 같다.

3.2 사용환경에 의한 영향

촉매의 사용조건은 고온의 배기가스에 노출되어 있으므로 온도에 의한 변형이 중요한 요소가 된다. 온도에 의한 관련요소들의 영향은 다음과 같다.

3.2.1 열에 의한 부풀어오름

테스트 벤치에서 전부하내구시험 촉매 내부 각 지점에서의 온도분포 및 시험후의 변형량은 Fig. 18과 같다.

또한 실차에서 140KPH로 주행시 및 배기가스 내구시험 모드의 하나인 11LAP에서 촉매내각부의 온도 분포는 Fig.19과 같다.

테스트 벤치에서 전부하 내구시험 촉매 내부 온도를 측정된 결과, 앞촉매 및 뒷촉매의 매트선단의 배기가스와 노출되는 부분의 온도가 촉매입구의 배기가스 온도보다 251°C, 168°C 높게 나타났으며, 이는 배기가스의 유속이 매트선단에서 정체되면서 나타나는 압력이 매트선단 온도를 상승시켜 셀의 열변형을 증대시킨 것으로 사료되며, 이를 방지하기 위하여는 매트선단에 배기가스가 직접 닿지 않는 구조로의 설계가 필요한 것으로 판단된다.

또한 매트를 기준으로 촉매중앙부 담체표면과 셀표면의 온도차는 352°C로서 매트의 단열효과가 우수함을 보여준다.

실차상태에서 촉매내부 온도를 측정된 결과, 실차가 테스트 벤치에서와 같이 최고부하조건까지 운전하는 것은 어려우며, 이에 따라 배기가스의 온도가 낮고 실외에서 운행하는 관계로 바람

에 의한 냉각이 동시에 진행되므로 테스트 벤치에서 측정된 온도에 비하여 낮게 나타나나, 매트선단에서의 온도는 다른 부위에 비하여 높게 나타난다. 또한 촉매중앙의 담체 표면온도는 테스트 벤치에서와 동일하게 매트선단에 낮게 나타나며 실주행조건인 140KPH에서는 차속에 따른 공기 유입으로 11LAP에 비하여 온도가 낮게 나타난다.

이러한 촉매변환기의 온도는 셀의 열팽창에 의한 변형을 촉진하여 셀의 부풀어오름을 증대시켜 GBD 감소 효과를 가져온 것으로 사료된다.

3.2.2 촉매내부 온도 구배 분포에 의한 영향

촉매 입구로 유입되는 배기가스는 배기관의 유체마찰 손실 및 배기관의 형상에 의하여 속도 및 온도 구배를 가지며 촉매에 도달될 때에는 촉매전면에 온도구배를 가져온다. 이를 측정된 결과 Fig.20과 같다.

담체주위를 감싸고 있는 매트는 촉매내부 온도 구배에서 온도가 높은 부위와 접촉하여 있는 단촉부 매트 온도를 높게 유지함으로써 다른 부위에 비하여 매트침식을 촉진시킬 수 있으며, 담체를 싸고 있는 매트 접합면의 위치 및 벌어짐에 따라서 매트침식을 가속화시킬 수 있으므로 매트의 취약부위는 가능한 한 단촉부를 피하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

3.2.3 커버에 의한 촉매온도에의 영향

커버는 촉매주위를 감싸서 외부로부터 촉매에 가해지는 충격을 흡수하며, 냉시동시 촉매의 활성을 조속하게 하기 위하여 사용되나, 차량이 고

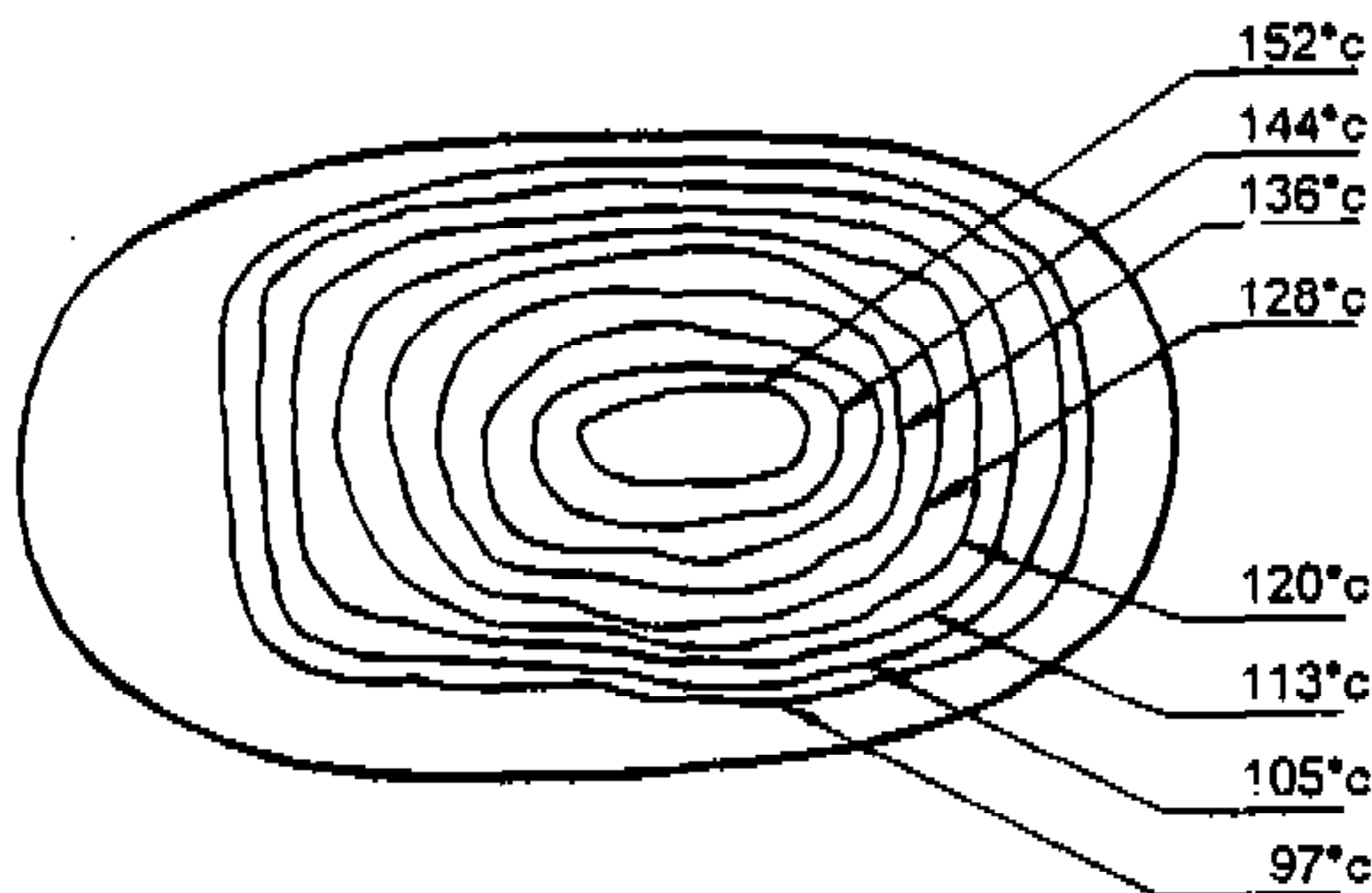


Fig.20 Isothermal line of Mondolith

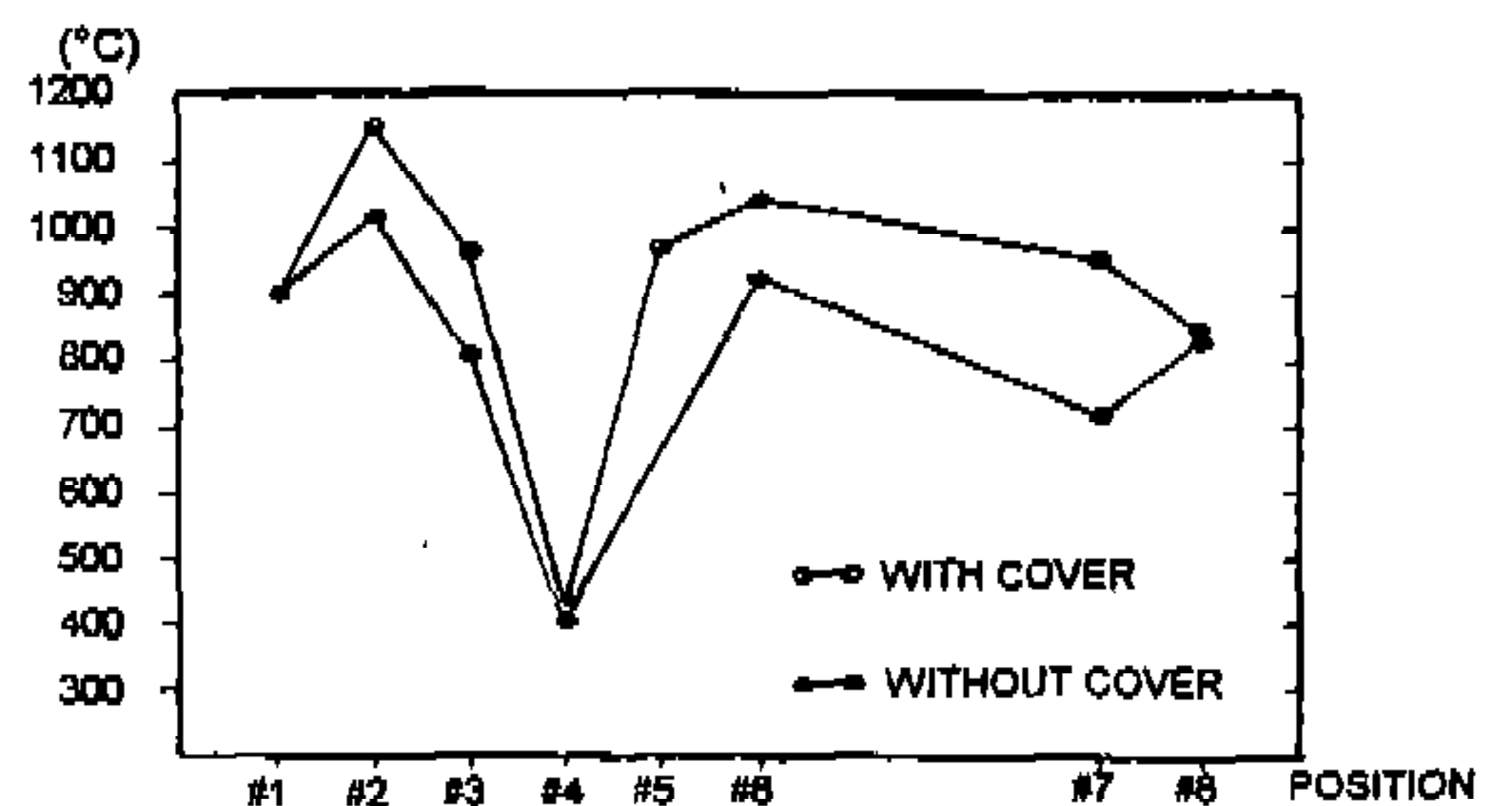


Fig.21 Converter Temperature With Converter vs. Without Converter

속 고부하에서 작동될 때는 촉매변환기의 온도상승에 따라 셀의 부풀어오름을 증대시켜 매트침식을 증대시킬 수도 있으므로 커버 유무에 따른 촉매변환기 내부의 온도를 측정하여 보면 Fig.21 (측정위치는 Fig.18 참조)와 같이 나타난다.

벤치테스트에서 전부하 성능 시험시 촉매 내부 온도 분포를 측정한 결과 커버를 제거함에 따라 앞촉매 매트선단에서는 52°C 저감되고, 매트와 담체 접촉면의 온도는 152°C 저감됨으로서 매트의 내구성을 증대시켜 준다. 따라서 커버의 적절한 설계로 촉매변환기의 온도를 저감시켜 줌으로서 셀의 열변형에 따른 GBD 감소 효과를 줄 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 촉매변환기 결합중의 하나인 매트침식에 영향을 주는 인자들을 분석하여 다음과 같은 설계개선효과에 대한 결과를 얻었다.

- 1) 촉매변환기를 구성하는 각 요소들의 공차가 GBD를 저감시키는 방향으로 조합될 경우, 매트침식을 유발시키기 시작하므로 이를 고려하여 캐닝시 담체가 깨어지지 않고 캐닝후 최초 출발시 담체를 지지할 수 있는 수준의 여유 있고 적절한 지지압력을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 2) 캐닝시 매트반력에 의한 캔의 부풀어오름은 캔의 리브 형상에 따라 영향을 주므로 철저한 사전예측을 통하여 셀의 부풀어오름을 줄일 수 있는 설계가 요구된다.
- 3) 매트 선단의 온도 상승에 의한 셀의 열변형 증대를 방지하기 위하여는 매트 선단이 배기가스에 노출되지 않도록 하는 구조로의 설계가 필수적이라고 사료된다.
- 4) 촉매내부 온도 구배에 의한 영향을 줄이기 위하여는 매트 접합면의 위치를 촉매 단축부보다 장축부에 가깝게 위치하도록 하는 것이 유리하며, 매트 접합면의 벌어짐을 최대한 줄여 캐닝할 수 있도록 하여야 한다.
- 5) 매트를 촉매지지재로서 사용할 시 단열효

과가 뛰어나나, 셀의 열변형에 의한 GBD 저감으로 매트침식이 유발될 가능성이 높아짐으로, GBD개선을 위하여 촉매변환기의 온도저감이 필요하며 이를 위하여 커버 일부 삭제를 검토할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

1. Paul D. Stroom and Suresh T. Gulati, "Systems Approach to Packaging Design for Automotive Catalytic Converter", SAE Paper 900500, 1990
2. Suresh T. Gulati and John Tem Eyck, "New Developments in Packaging of Ceramic Honeycomb Catalysts", SAE Paper 922252, 1992
3. Ceramic Materials Department/3M, "Intumescent Mat Mount", 1986
4. Carborundum, "Fiberfrax Ceramic Fibers for Automotive Industry", 1989
5. Suresh T. Gulati and R. P. Merry, "Design Considerations for Mounting Material for Ceramic Wall-Flow Diesel Filters", SAE Paper 840074, 1984
6. Suresh T. Gulati and D. K. S. Chem, "Isostatic Strength of Porous Cordierite Monoliths", SAE Paper 910375, 1991
7. D. Maret and Suresh T. Gulati, "System Durability of a Ceramic Racetrack Converter", SAE Paper 912371, 1991
8. Dieter Kattge, "Advanced Canning Systems for Ceramic Monoliths in Catalytic Converters"
9. Melvin N. Ingalls, E. Robert Fanick and Edward G. Ruescher, "Utilization of Whole Catalyst X-Rays", SAE Paper 852133, 1985
10. Anil Uerma, "Rib Selection to Ensure Optimum Monolith Stresses in Catalytic Converters", SAE Paper 910376, 1991