

유한요소법을 이용한 플라스틱 실린더 헤드커버의 설계평가에 관한 연구

김정엽(경희대 기계공학과), 최명진(경희대 기계공학과)
오택열(경희대 기계공학과), 조종효(삼기기공(주))

Abstract

This study is pre-research to evaluate the reasonability of conversion aluminum alloy cylinder head cover into plastic cylinder head cover using finite element analysis. The basedata which are needed in design are shown. On processing the study, size of mesh and kind of elements are varied and adaptiv method is used.

제 1 장 서 론

1-1. 연구동향

환경문제는 가장 중요한 문제의 하나로 대두되고 있으며, 이와 더불어 자동차 배기 가스 절감을 통해 공해 요인을 감소시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 자동차 경량화는 연비 향상에 기여하여 배기 가스를 줄임으로써 깨끗한 환경을 유지시키는 데에 일익을 담당하며, 또한 새로운 소재의 개발과 그 이용 기술을 확보한다는 점에서 관련분야의 파급효과가 지대하리라 사료된다.

자동차 부품 재질은 강재에서 알루미늄 합금으로 대체되고, 알루미늄 합금을 여러 가지 특성에 맞는 공업용 플라스틱이나 다른 복합재료로 대체되고 있다. 과거에는 복잡한 자동차 구조에 해석적방법의 적용이 매우 힘들었기 때문에 구조물의 거동이나 성능을 실험적으로 평가하였다. 새로운 상품 개발을 위해서는 기존 제품에 대한 경험이나 실험적 데이터만으로는 신속하고 정확한 설계가 어려워 컴퓨터 시뮬레이션의 중요성이 대두되고 컴퓨터 시뮬레이션은 자동차 업계에서 이미 설계를 위한 필수적인 도구로서 자리잡고 있으

며, 기존제품의 설계변경이나 새로운 제품의 설계에 활발히 적용되고 있다. 자동차 CAE의 양상은 구조물의 파손 예측 및 원인분석보다는 초기 설계단계에서의 최적화가 중요시 되고 있다. 즉 값비싼 모형차를 통한 시험을 지양하고, 해석적 방법을 도입하여 공학에서 추구하는 모든 목적(강도, 강성, 동특성, 조립성, 생산성과 경제성 등)을 충족시킬수 있도록, 설계변수를 결정하는 것이다.

1-2. 연구목적

본 연구에서는 알루미늄 실린더 헤드 커버를 공업용 플라스틱 재료로 변환 시키기 위한 타당성 검토를 위하여 구조해석을 통한 기초 데이터 확보에 중점을 두었으며 본 연구에서 얻어진 구조 해석 결과를 기초 data로 사용하여 실린더 헤드커버의 형상을 변화시킴으로써 열변형에 대한 안정성을 유지하고 공정상의 단축방안을 확보하고, 제작비의 절감에 기여하고자 한다. 즉 자동차 엔진용 실린더 헤드커버를 공업용 플라스틱 실린더 헤드커버로 대체시키기 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 타당성을 검토하고 플라스틱 소재에 대한 기계적 특성을 미리 예측함으로써, 시제품 제작에 소요되는 막대한 시간과 재원을 줄이기 위함이다.

1-3. 연구방법

플라스틱으로 소재를 바꾸려고 할 때 플라스틱은 알루미늄에 비해 열에 약한 특성이 있으므로 열응력을 고려하는 것이 중요하며, 실린더 헤드커버의 형상에 대한 구조해석을 위해 기존의 알루미늄 소재용 도면에 기초하여 유한요소해석을 채택하여 수행한다. 요소분할에 있어서 해석결과

의 정확성과 빠른 수렴을 위해서 적용해석법을 이용하고자 한다. 그리고 bilinear element와 quadratic element의 결과를 비교하고자 한다. 플라스틱 소재는 기계적 성질이 온도에 따라 변하므로, 재료의 물성에 대한 파라미터를 설정하여 응력해석, 모드해석, 그리고 Optimization을 시행함으로써 응력분포, 외형변화, 진동특성, 누설 여부, 중량의 최소화 설계를 살펴본다. 그리고 설계조건상 가스킷과 접하는 부분의 변형이 1mm이내에 있어야 하므로 이에 초과되는 변형이 있을시 변형량을 줄이기 위한 설계제안을하고자 한다.

제 2 장 본 론

2-1. 유한요소법

유한요소법(Finite Element Method)은 복잡한 기하학적 형상을 갖는 경우의 공학적 해석에 있어서 유효한 허용 오차내에서 정확하게 해석결과를 얻을 수 있다. 다만 Mesh Generation에 많은 시간을 필요로 하고 계산량이 많으며, 경계 조건을 현실감있게 부여하여야 한다는 어려운 점이 있다. 그러나 초기 단계의 형상 분할이 끝나면 여러조건하에서 응력해석, 진동해석등을 효율적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다.

2-2. 플라스틱의 물성

플라스틱을 쓰는 이유는 경제성이 높고 중량의 감소를 가져다주며 성형성이 좋기에 여러 가지 부품을 하나로 통합할수 있으며 특수한 목적 즉 방음, 열절연, 전기절연 등에 쓰일수 있고 유지보수에 비용이 적게 들기 때문이다. 단점으로는 열에 약한 특성이 있으며 폐기물 처리문제를 들수 있다. 본 연구에 사용된 플라스틱은 Nylon 계열의 Polyamide이며 DU PONT社에서 공급하고 있는 Minlon 22C이며 기계적성질을 향상시키기 위해서 Glass fibre와 Mineral로 강화 시켰다. 기계적 화학적 열적특성이 우수하며 상대가격도 저렴하다. Injection molding을 통해 제작되며 exterior autoemotive body arts, air cleaner, valve covers, shrouds와 같은 곳에 쓰인다.

2-3. 적용해석법

유한요소법에 의한 해석결과는 분할요소의 크기와 사용요소의 형태에 따라서 그 값이 크게 달라지기 때문에 요소선정과 분할방법에 세심한 배려가 필요하다. 해석영역이 비교적 간단한 형상의 구조물에 대해서는 해석자의 경험과 직관에 의하여 합리적인 요소분할이 가능하지만 구조물이 복잡해지면 요소를 적절히 분할하기가 쉽지 않기 때문에 이에 따른 오차를 무시할 수 없으며 따라서 해석결과에 대한 신뢰성이 문제가 된다. 따라서 해석결과의 오차를 미리 일정하게 설정하고 이에 부합하는 유한요소해석결과가 초기 요소분할상태에 관계없이 얻어질 수 있도록 하여 해석자와 무관하게 유한요소해의 신뢰성을 높이고자 하는 방법이다.

◎ H-method

요소의 분할오차(element discretization error)가 큰 요소를 자동적으로 세분화하여 해석결과의 정확도를 향상시키는 방법으로서 사용자가 원하는 정도의 분할오차를 갖는 해석결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 설정한 허용오차가 작을 경우 요소의 세분에 의해 새롭게 생성된 절점수가 본래의 절점수 보다 급격히 증가하게 되어 해석에 많은 시간이 소요되고, 사용자가 지정한 오차보다 요소의 오차가 작게 평가된 요소에 대해서는 요소크기를 조정할수 없다는 단점이 있다

◎ R-method

초기 요소망에 대하여 분할 오차를 계산하고 이 오차의 분포가 평준화될 때까지 절점의 좌표를 이동시킴으로써 요소의 크기를 재조정하는 방법으로서 전체 절점의 수를 일정하게 유지하면서 분할오차를 평준화시킬 수 있다는 장점이 있으나, 사용자가 원하는 분할오차를 갖도록 하기에는 절점의 수가 일정하게 유지되기 때문에 한계가 있다는 단점이 있다.

◎ P-method

분할오차가 큰 요소의 형상함수차수(shape function order)를 증가시키는 방법이다.

◎ HP-method

H-method와 P-method를 동시에 사용하여 해석의 성능을 향상시키는 방법이다.

의 정확성과 빠른 수렴을 위해서 적응해석법을 이용하고자 한다. 그리고 bilinear element와 quadratic element의 결과를 비교하고자 한다. 플라스틱 소재는 기계적 성질이 온도에 따라 변하므로, 재료의 물성에 대한 파라미터를 설정하여 응력해석, 모드해석, 그리고 Optimization을 시행함으로써 응력분포, 외형변화, 진동특성, 누설 여부, 중량의 최소화 설계를 살펴본다. 그리고 설계조건상 가스킷과 접하는 부분의 변형이 1mm이내에 있어야 하므로 이에 초과되는 변형이 있을시 변형량을 줄이기 위한 설계제안을 하고자 한다.

제 2 장 본 론

2-1. 유한요소법

유한요소법(Finite Element Method)은 복잡한 기하학적 형상을 갖는 경우의 공학적 해석에 있어서 유효한 허용 오차내에서 정확하게 해석결과를 얻을 수 있다. 다만 Mesh Generation에 많은 시간을 필요로 하고 계산량이 많으며, 경계 조건을 현실감있게 부여하여야 한다는 어려운 점이 있다. 그러나 초기 단계의 형상 분할이 끝나면 여러조건하에서 응력해석, 진동해석등을 효율적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다.

2-2. 플라스틱의 물성

플라스틱을 쓰는 이유는 경제성이 높고 중량의 감소를 가져다주며 성형성이 좋기에 여러 가지 부품을 하나로 통합할수 있으며 특수한 목적 즉 방음, 열절연, 전기절연 등에 쓰일수 있고 유지보수에 비용이 적게 들기 때문이다. 단점으로는 열에 약한 특성이 있으며 폐기물 처리문제를 들수 있다. 본 연구에 사용된 플라스틱은 Nylon 계열의 Polyamide이며 DU PONT社에서 공급하고 있는 Minlon 22C이며 기계적성질을 향상시키기 위해서 Glass fibre와 Mineral로 강화 시켰다. 기계적 화학적 열적특성이 우수하며 상대가격도 저렴하다. Injection molding을 통해 제작되며 exterior autoemotive body arts, air cleaner, valve covers, shrouds와 같은 곳에 쓰인다.

2-3. 적응해석법

유한요소법에 의한 해석결과는 분할요소의 크기와 사용요소의 형태에 따라서 그 값이 크게 달라지기 때문에 요소선정과 분할방법에 세심한 배려가 필요하다. 해석영역이 비교적 간단한 형상의 구조물에 대해서는 해석자의 경험과 직관에 의하여 합리적인 요소분할이 가능하지만 구조물이 복잡해지면 요소를 적절히 분할하기가 쉽지 않기 때문에 이에 따른 오차를 무시할 수 없으며 따라서 해석결과에 대한 신뢰성이 문제가 된다. 따라서 해석결과의 오차를 미리 일정하게 설정하고 이에 부합하는 유한요소해석결과가 초기 요소분할상태에 관계없이 얻어질 수 있도록 하여 해석자와 무관하게 유한요소해의 신뢰성을 높이고자 하는 방법이다.

◎ H-method

요소의 분할오차(element discretization error)가 큰 요소를 자동적으로 세분화하여 해석결과의 정확도를 향상시키는 방법으로서 사용자가 원하는 정도의 분할오차를 갖는 해석결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 설정한 허용오차가 작을 경우 요소의 세분에 의해 새롭게 생성된 절점수가 본래의 절점수 보다 급격히 증가하게 되어 해석에 많은 시간이 소요되고, 사용자가 지정한 오차보다 요소의 오차가 작게 평가된 요소에 대해서는 요소크기를 조절할수 없다는 단점이 있다

◎ R-method

초기 요소망에 대하여 분할 오차를 계산하고 이 오차의 분포가 평균화될 때까지 절점의 좌표를 이동시킴으로써 요소의 크기를 재조정하는 방법으로서 전체 절점의 수를 일정하게 유지하면서 분할오차를 평균화시킬 수 있다는 장점이 있으나, 사용자가 원하는 분할오차를 갖도록 하기에는 절점의 수가 일정하게 유지되기 때문에 한계가 있다는 단점이 있다.

◎ P-method

분할오차가 큰 요소의 형상함수차수(shape function order)를 증가시키는 방법이다.

◎ HP-method

H-method와 P-method를 동시에 사용하여 해석의 성능을 향상시키는 방법이다.

2-4. 오차의 평가

요소분할에 따른 해석결과의 오차를 정확히 평가하는 방법으로서 현재까지 많은 방법들이 제안되어 왔으며, 주로 변형률에너지 또는 응력분포에 기준하여 요소분할에 따른 오차를 평가하는 방법들이다. 이 중에서 1987년 Zienkiewicz와 Zhu가 제안한 해석후 오차평가방법(posteriori error estimates)은 해석영역의 응력분포에 기준하여 요소분할에 따른 오차를 비교적 간단하게 평가할 수 있어 널리 사용되고 있다. 선형탄성문제에서 요소의 응력분포함수는 미분계수행렬에 의해 각 요소의 경계에서 불연속적으로 분포하게 되며, 이로 인하여 유한요소해는 변위분포에 비해 부정확한 값으로 평가된다. 정확한 오차(e)는 엄밀해(σ)와 근사해(σ_a)와의 차이이다.

$$e = \sigma - \sigma_a \quad (2-1)$$

그러나 대다수의 문제에서 오차평가지 사용하는 엄밀해는 구할 수가 없다. 그러므로 본 연구에서는 Zienkiewicz-Zhu가 제안한 방법을 이용하였다. 즉, 엄밀해 대신 형상함수로 보간한 평균응력을 이용하면 유한요소해석을 통해 얻어지는 근사해보다 정확도가 향상된 응력해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma^* = N \sigma_a \quad (2-2)$$

(σ^* 는 평균응력 N 은 요소의 형상함수이다.)

이제 유한요소의 응력해를 σ 로 표시하면 요소에서의 응력오차는 다음과 같이 정의된다.

$$e_\sigma = \sigma^* - \sigma_a \quad (2-3)$$

2-5. Element Distortion

유한요소법에서는 element의 모양이 이상적인 모양 즉 정사각형, 정삼각형, 정육면체가 되어야 정확한 결과가 나온다. 그러나 실제의 경우 모든 element가 이상적으로 될 수는 없다. 반드시 어느 정도의 Distortion이 생기게 된다. 해석결과는 Distortion의 정도에 따라 오차를 수반하게 된다. 어느 정도 이상의 Distortion이 있을 경우는 정확한 결과를 얻기는 어렵다. 그러므로 본연구에서

는 각각의 element의 aspect ratio는 0.5이상, skew를 고려하여 내부각이 45에서 135의 범위에 있게하고, warping factor를 되도록 작게 나타내었다.

2-6. 실제모델

Fig. 2-1는 실제모델을 나타낸다. SOHC엔진용 알루미늄실린더 헤드커버이다.

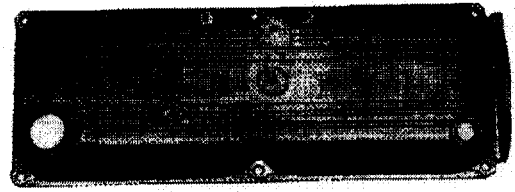


Fig. 2-1 Real Model

2-7. 유한요소모델

실제모델(알루미늄실린더 헤드커버)에 사용되는 도면을 기초로하여 해석시 중요하지 않다고 판단되는 실린더헤드커버의 윗부분을 단순화 시켰다.

Fig. 2-2은 Finite Element Model I을 나타낸다. Fig. 2-3는 Finite Element Model II이다. 이 모델은 적응해석법을 이용하였다. Fig 2-4는 Finite Element Model III이며 quadratic element를 사용하였다.

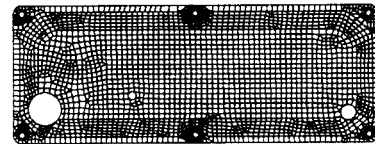


Fig.2-2 Finite Element Model (I)

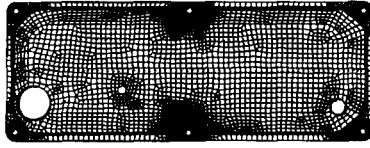


Fig. 2-3 Finite Element Model (II)

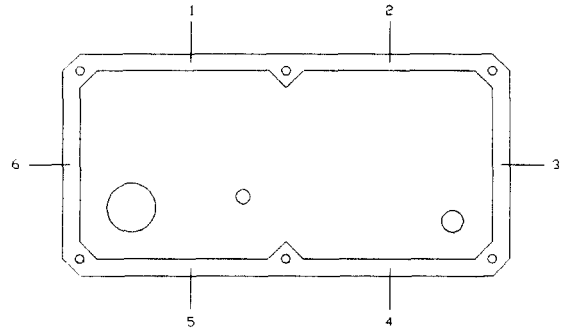


Fig. 3-1 Cylinder Head Cover

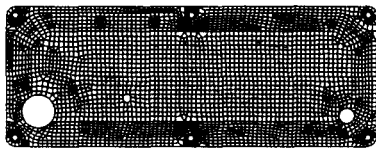


Fig. 2-4 Finite element Model (III)

2-8. 경계조건

볼트의 체결부위는 모든방향의 자유도를 구속한다. 설계상요구하는 0.5kg/cm^2 의 압력이 요소에 수직하게 작용하는 것으로 하였다. 열응력의 발생은 온도의 불균형과 온도의 변화에 의해 발생하는데 본 연구에서는 온도의 불균형에 의한 열응력은 고려하지 않기로 한다. 온도의 변화에 의한 열응력을 계산할 때 가혹한 환경으로 경계조건을 설정하기로 한다. 그리고 본 플라스틱은 등방성(isotropic)이라 본다. 온도를 고려할 때 우리나라에서는 최저온도를 -20°C 로 보고 냉각수가 흐르기 때문에 최고온도는 100°C 로 하였다.

제 3 장 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 I-DEAS, MSC/NASTRAN을 이용하였다. 본 연구에서 응력은 Von-mises stress로 보고 변형은 Fig. 3-1에 나타낸 번호중에 2번만의 변형을 검토하기로 한다. 그 이유는 2점에서의 변형만으로도 충분히 실린더헤드커버의 누설여부를 판단할수 있기 때문이다.

3-1. Linear analysis

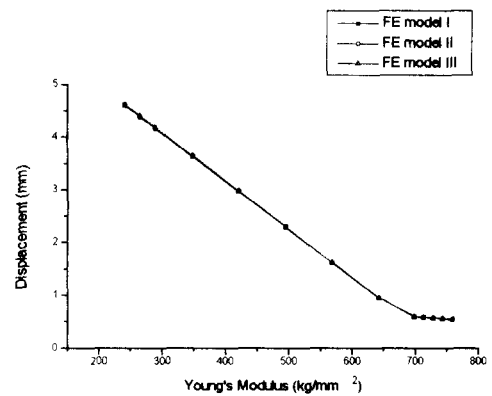


Fig 3-2. Correlation between Young's Modulus and Displacement

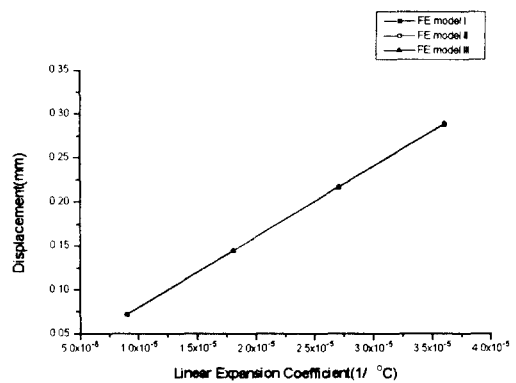


Fig 3-3. Correlation between α and displacement

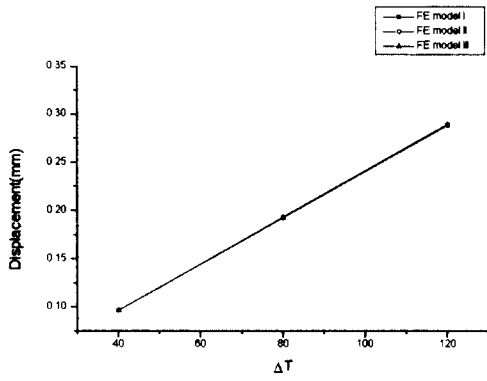


Fig. 3-4 Correlation between ΔT and Displacement

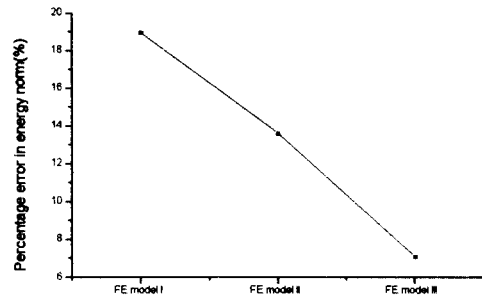


Fig. 3-6 Percentage error in energy norm

온도(°C)	영계수(kg/mm ²)
-20	757
23	692
77	295
121	189

Table 3-1. Correlation between Young's Modulus and Temperature

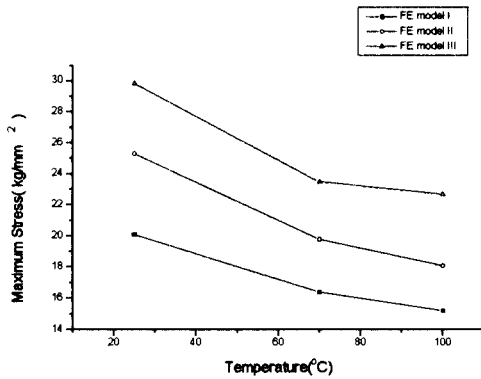


Fig. 3-5 Correlation between Temperature and Maximum stress

플라스틱은 영계수가 온도에 따라 변한다. 온도에 따른 영계수 각각에 대해서 linear 해석을 해 보았고 또 하나의 영계수에 대해서 온도차를 변화시켜가면서 해석을 하였고 결과를 그래프에 나타내었다. 그래프를 보면 영계수의 변화에 의한 압력의 영향이 가장 지배적임을 알수 있다. 그리고 온도의 변화를 고려했을 때 2번 node의 변위는 약 8mm가 나왔다.

3-2. Normal mode analysis

Lanzos Method를 이용하여 eigenvalue를 구하였다. 이때 감쇠효과는 고려하지 않는다. 온도에 따라 영계수가 변한다. 그러므로 고유진동수도 온도에 따라 변한다. Fig. 3-7를 보면 온도에 따라 고유진동수가 변하는 것을 알 수 있다.

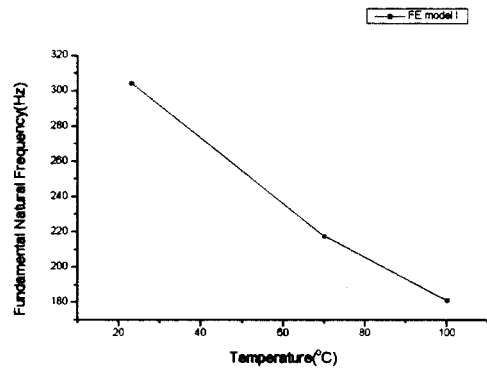


Fig.3-7 Correlation between Fundamental Natural Frequency and Young's Modulus

제 4 장 결 론

1. 현재의 도면을 유지하여 플라스틱으로 재질을 바꿀 경우 공진의 위험은 없으나 응력과 변형으로 인해 파괴될것으로 예측된다.
2. 재료의 선택을 달리한다면 온도가 변하여도 500kg/mm²을 유지하는 재료를 선택하여야 한다.
3. 시간적인 측면에서 quadratic element는 경제성이 없다.
4. 플라스틱 실린더 헤드커버로 대체시킬 경우 누설방지를 위하여 강성보강에 필요한 부분설계 수정이 요구되며 이는 가스킷의 누설가능범위와 함께 복합적으로 검토되어야 할 것이다.

[REFERENCE]

1. Tirupathi R. Chandrupatla and Ashok D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice hall
2. O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, The Finite Element Method 4th edition , McGraw-hill
3. Robert D. Cook , David S. Malkus and Michael E. Plesha, Concepts and applications of finite element analysis, 3rd edition, John wiley and sons
4. Bathe, Finite element procedures, Prentice hall
5. Daryl L. Logan, A first course in the finite element Method, PWS
6. 오형석, 有限要素解의 正確度 調節을 위한 適應解析法, 大韓機械學會論文集(A)제20권 제7호 pp.2067-2077, 1995
7. 이교승, 유한요소법을 이용한 직접분사식 디젤 엔진 실린더 헤드의 온도 및 열응력분포 해석(I), 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 1995
8. 박정규, NA/SI엔진의 헤드와 블록의 온도 및 열응력 분포 해석, 경희대학교 산학협력기술연구원 워크샵 논문 초록집, 1995
9. MSC/NASTRAN, Handbook for Nonlinear Analysis.
10. Zienkiewicz, O. C. and Zhu, J. Z., 1987, " A Simple Error Estimator and Adaptive

Procedure for Practical Engineering Analysis," International Journal of Numerical Methods in Engineering., Vol 24 pp.337-357

11. Ainsworth, M., Zhu, J. Z., Craig, A. W. and Zienkiewicz, O. C., 1989, " Analysis of the Zienkiewicz-Zhu posteriori Error Estimator in Finite Element Method," International Journal of Numerical Methods in Engineering.

12. Maxwell, J., " Plastics in the automotive industry ", woodhead publishing, 1994