

무단변속기(CVT) 벨트-풀리 시스템에 관한 고찰

A Study on the Belt-Pulley System of Continuously Variable Transmission

이 충 섭, 조 회 복
C. S. Lee, H. B. Cho



이 충 섭
· 정회원, 현대자동차
중앙연구소 TM 선행
연구팀, 과장
· 무단변속기 벨트-풀리
시스템 개발



조 회 복
· 정회원, 현대자동차
중앙연구소 TM 선행
연구팀, 팀장
· 무단변속기 개발

1. 서 론

변속기(Transmission)는 수시로 변하는 주행저항에 대응하여 엔진 동력의 속도와 토크를 조절하는 장치로써, 엔진 시동이 가능하도록 부하를 단절시키거나, 후진을 가능하게 하거나, 등판로 주행 시 엔진 토크를 증대시켜 큰 구동력을 얻는 것 등을 가능하게 해 주고 있다.

이러한 변속기에는 운전자 스스로 판단하여 기어변속을 행하는 수동변속기(Manual Transmission)와, 기어변속이 자동으로 행해

지는 자동변속기(Automatic Transmission)로 대별되며, 변속단(變速段)이 유한(有限)하게 존재하는 유단(有段)변속기는 일정 기어비로 고정되어 운전되므로 최적의 엔진 출력점 및 최소 연료소비점을 효과적으로 사용하는 것이 어려운 현실이다. 이러한 단점에 대응하기 위해서는 기존 변속기의 변속단수를 증가시킬 필요가 있지만, 중량 및 원가 때문에 다단화에는 한계가 있다. 이에 반하여 무단변속기(Continuously Variable Transmission)는 주어진 변속패턴에 따라 최소-최대 변속비 사이를 연속적으로 무한대(無限大)의 단(段)으로 변속시킴으로써 엔진특성을 최대한 사용하여 우수한 동력성과 연비 성능을 양립시키는 운전을 가능하게 해 준다.

본 보고서에서는 다양한 소비자들의 동력 성능 및 저연비(低燃費) 요구에 대응하기 위해 자동차 메이커들에 각광을 받고 있는 무단변속기에 있어서, 벨트 개발 전문업체들에 의해 개발되고 있는 벨트-풀리 변속시스템의 종류를 소개하고, 현재 실용화에 성공한 벨트-풀리 시스템에 대한 효율 및 설계 인자들을 분석하고, 나아가서 벨트의 적용한계

를 조사 분석함으로써 고유의 벨트-폴리 시스템 개발이나, 무단변속기 개발시 도움을 주기 위함이다.

2. CVT 벨트의 종류

자동차 메이커나 개인발명가들에 의해 개발되고 있는 무단변속기는 여러 가지 형식이 있으나, 그 대부분은 기존의 변속기와 비교하여 소음, 효율, 내구성, 중량, 탑재성, 제작 단가 및 제어 용이성 등의 단점을 내포하고 있기 때문에 승용차용으로 양산(量産)하는데 성공하지 못하고 있으며, 현재 승용차용으로 실용화에 성공한 무단변속기는 벨트-폴리식이 유일하다¹⁾.

벨트-폴리식 무단변속 시스템은 Fig.1과 같이 가변 쉬이브(Movable Sheave)와 고정 쉬이브(Fixed Sheave)로 이루어진 두쌍의 폴리(Pulley)에 금속 V-벨트가 끼워져서 구동되는 구조로, 가변쉬이브의 축방향 이동에 따라 벨트와 폴리와의 유효접촉반경의 변화로 변속비가 변하는 변속장치를 말한다.

이러한 벨트-폴리 변속시스템에 이용되고 있는 벨트에는 고무벨트, 금속체인 및 금속 벨트등이 있으며, 이들 중에 가장 널리 사용

되고 있는 것은 네덜란드 VDT社에서 개발한 금속벨트이다.

2.1 고무벨트

고무벨트를 이용한 예는 네덜란드 DAF社(現, NeDar)에서 개발한 바리오매틱(Vario-matic)이 있으며, 이 무단변속기는 1965년 이전까지 볼보 300시리즈에 장착되어 약 30만대가 양산 판매되었으나 고무벨트의 내구성 때문에 지금은 자취를 감추었다.

고무는 진동을 차단하는 성질이 있기 때문에 좋은 재질이지만, 강도적으로 약하기 때문에 동력전달력은 미미하다. 또한 운전중에 벨트 내측이 인장과 압축을 반복하여 고무의 내부마찰열이 발생하므로 회전속도에 한계가 있다.

현재 무단변속기용으로 고무계 V-벨트를

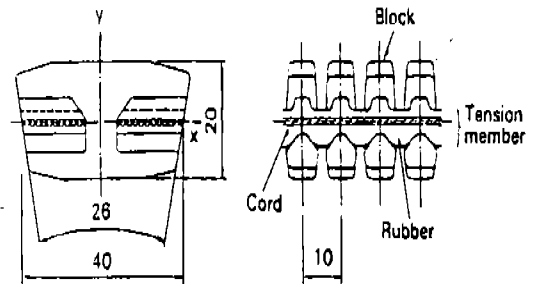


Fig.2 Rubber Belt(Bando)

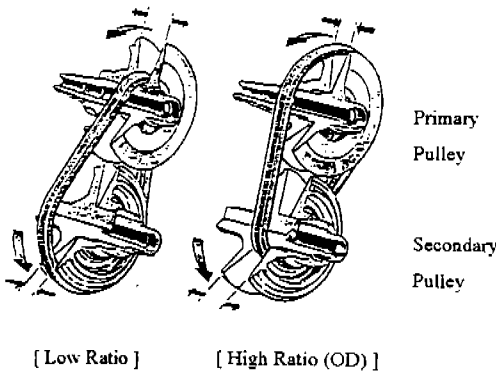


Fig.1 Principle of Belt Drive CVT

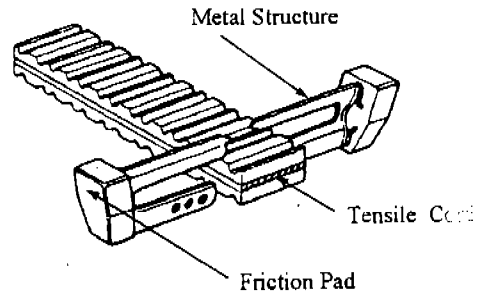


Fig.3 Rubber Belt(Gates)

개발하고 있는 업체로는 미국의 게이트社 (Gates Rubber Co.) 및 일본의 반도社 (Bando Chemical Co.) 등이 있으며, 이들 업체들은 케블라(Kevlar, 듀폰社의 상품명이며 정식명칭은 폴리아미드) 등의 복합재료로 만들어진 코드를 이용하여 블록을 결합하는 인장체를 만들어서 벨트강도가 대폭 향상된 V-벨트를 개발하고 있다²⁾.

케블라는 강보다 3배의 강도를 가지므로 벨트의 강도를 대폭 상승시켰으며, 코드 전체에 똑같은 장력을 가지게 하므로 순수한 고무벨트보다 큰 동력 전달이 가능하다. 그러나 케블라로 강도를 확보하더라도 케블라와 고무사이에는 전단력에 의해 끊어져 버린다. 현재 Gates社 벨트의 내구성은 약 5만km 정도로 자동차에 채용하기는 어려우나, 일반산업용으로는 충분히 실용화가 가능하리라 판단된다.

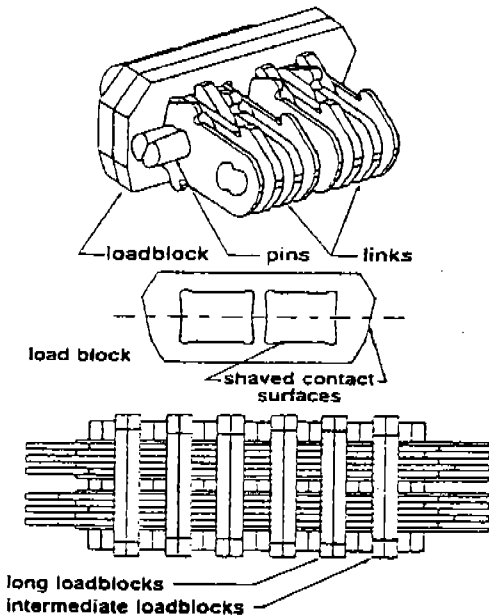


Fig.4 Metal Chain(BWA)

2.2 금속 체인

금속체인을 개발중이 업체는 미국의 BWA社(Borg Warner Automotive), 독일의 PIV社등이 있으며, 이들 금속체인은 일반적인 동력전달용 체인을 개량하여 무단변속기용으로 개발한 것이다.

Fig.4은 BWA社에서 동력전달용 체인을 무단변속기용으로 개발한 것으로, 폴리의 축방향하중을 로드 블록(Load Block)이 받도록 한 구조이며, 핀(Pin)의 마모로 인한 체인의 인장 및 소음 그리고, 링크(Rink)의 길이 때문에 폴리상에서 금속벨트나, 고무벨트에 비해 작은 회전반경을 얻을 수 없다는 단점을 지니고 있다.

로드블록과 폴리간의 윤활은 유체윤활로서 VDT벨트에 버금가는 마찰계수를 가지고 있으며, 동력전달능력도 거의 같다고 보여진다. 이 금속체인을 이용한 무단변속기가 1987년에 소개되었으며, 스즈키(Suzuki)社 1300cc 모델인 컬터스(Cultus)에 장착되어 소량으로 시판되고 있다³⁾.

한편, 독일 PIV사는 기존의 체인방식을 변형시켜 내부링크(Inner Link), 폴리의 축방향 하중을 받는 로커핀(Rocker Pin) 및 이 핀을 감싸는 걸쇠링크(Clasp Link)로 이루어져 있으며, Fig.5에서 보는 바와 같이,

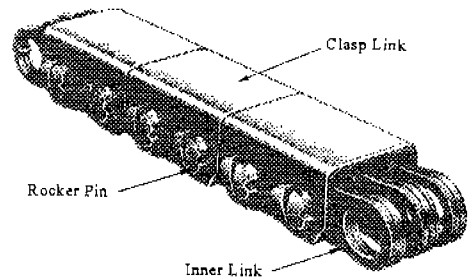


Fig.5 Metal Chain(PIV)

PIV 체인은 힘을 받는 로커핀의 양단부가 원형으로 가공되어 풀리와의 접촉시 점 접촉 상태가 되며, 이 때 접촉부의 오일압력의 증대로 점도가 증대되어 탄성유체윤활(Elasto Hydrodynamic Lubrication:EHL) 상태를 이루며, 유체윤활의 VDT벨트와 비교할 때 동력전달능력이 훨씬 높아진다.

체인구조는 비용 측면에서는 유리하나, 마디가 있기 때문에 그것이 풀리와 부딪힐 때 발생하는 충돌음은 피할 수가 없다. PIV 체인의 상품화에 최대장애는 소음문제라고 전해지며, VW, ZF, MB 및 BMW 등의 지원을 받아 개발 중에 있다⁴⁾.

2.3 금속벨트

금속벨트(Metal Belt)는 네덜란드의 VDT社(Van Doorne's Transmissie)에서 Fig.6와 같은 금속벨트를 개발하였으며, 이 벨트는 풀리의 축력을 받는 약 300개의 블록(Block, 또는 Element)과, 동력을 전달 가능하도록 이들 블록을 연결하는 유연한 얇은 판 형상으로 된 2개조의 링 조합체(Ring 또는 Band)로 구성되어 있으며, 블록과 풀리

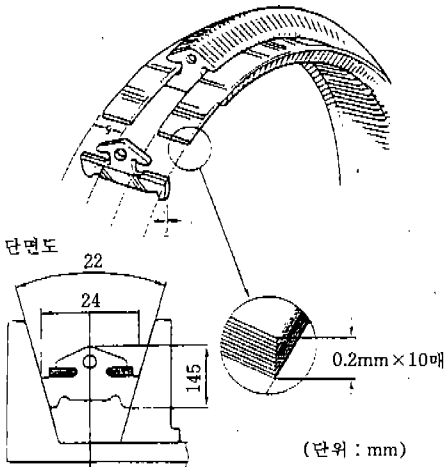


Fig.6 Metal Push Belt(VDT)

사이에는 유체윤활상태를 이루며, 블록의 압축력에 의해 동력을 전달하는 구조로써 기존의 인장벨트(Tension Belt)와는 달리 푸시벨트(Push Belt)라고 하며, 현재 실용화에 성공한 무단변속기용 벨트의 주류(主流)를 이루고 있다⁵⁾.

현재, 이 벨트는 VDT社에서 제작되어 유럽포드, 벨기에의 무단변속기 전문제작업체인 VCST社 및 일본의 후지중공업, 혼다자동차 등에 공급되고 있으며, 최근에는 블록두께가 얇은(두께 : 1.5mm) 저 소음 벨트 및 고토크용량(블록 폭 : 30mm)을 갖는 벨트도 개발 완료한 상태이고, 대학 및 연구소등에서 이 벨트에 관한 많은 연구가 진행 중에 있어서 이 벨트를 이용한 무단변속기의 장래가 매우 밝은 실정이다.

현재, 이 금속벨트를 적용하고 있는 무단 변속기 모델은 4~5개 정도로 가장 기본 모델인 P811, 마그네틱 파우더 클러치가 적용

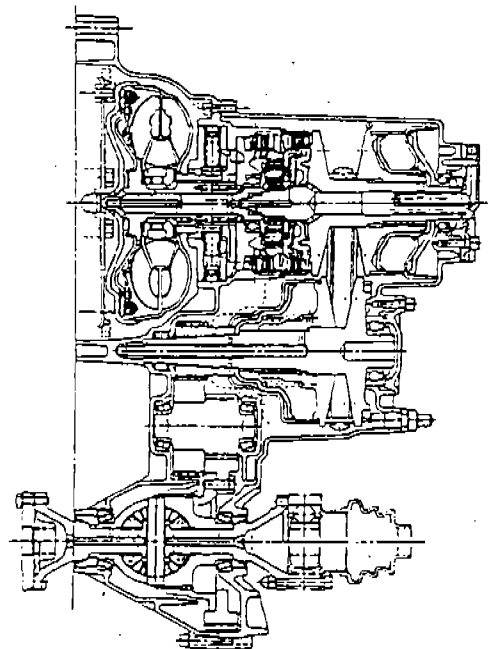


Fig.7 CVT Layout(P884)

된 소형모델인 P821, 토크컨버터를 적용하여 전자제어를 실현한 P884등이 있으며, Fig.7은 최근에 개발한 CVT의 레이아웃(Layout)을 보여주고 있다⁶⁾.

3. CVT 벨트의 특성

현재 대부분의 CVT에 적용되고 있는 VDT社의 금속벨트를 이용한 벨트-풀리 시스템에 대해 동력전달원리 및 효율 등에 대해 설명하고자 한다.

3.1 금속벨트의 동력전달 원리

금속벨트의 기본적인 동력전달원리는 벨트의 블록(Block 또는 Element)사이의 미는 힘(Push Force)에 의해 한 풀리에서 다른 풀리로 토크전달이 이루어지는 구조로 푸시벨트(Push Belt)라고도 한다.

벨트는 여러 점으로 된 2개조의 링 조합체와 여러 개의 블록으로 이루어져 있다. 여기서, 여러 점으로 된 링 조합체의 기능은 우선 벨트내에서 매우 강하지만 유연하게 장력(Tension)을 제공하는 것이고, 또한 풀리의 축력에 의해 초기장력을 받고 있으면서 풀리와 블록 사이에 마찰과, 블록 사이의 상호 미는 힘에 의해 블록이 토크를 전달 가능하도록 하는 기능을 하고 있다.

푸시벨트는 피로수명(Fatigue Life)과 강성(Stiffness) 측면에서 링을, 마모특성(Wear Property)과 강성(Stiffness) 측면에서 블록을 최적화 시켜야 하며, 벨트의 기계적인 강성은 토크를 전달하는 단품인 블록의 강성에 의해 결정된다. 또한 벨트는 벨트-풀리 접촉면에서의 마모를 방지하기 위해 윤활을 시켜야 하는데 이 오일은 벨트-풀리 제어 시스템에도 사용된다.

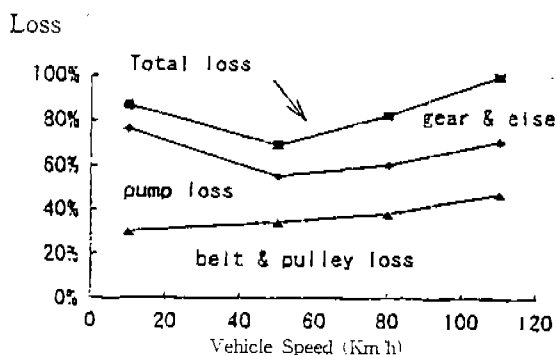


Fig.8 Loss Torque of CVT

3.2 CVT 효율

CVT의 일반적인 동력손실은 CVT 제어 시스템에 유압을 공급하고 각 부품에 윤활을 제공하는 유압펌프의 손실, 풀리의 축력에 따른 벨트-풀리간의 손실 및 각종 기어류 및 클러치 등의 손실로 이루어져 있다.

실제 CVT에 대해서 차속에 따른 손실토크를 보면 Fig.8과 같다⁷⁾. 여기서 볼 수 있듯이 저속에서는 펌프 구동토크가 손실의 주요원인이며, 고속에서는 벨트 손실 토크비가 증가하는 것을 알 수 있다.

벨트손실은 벨트에 작용하는 풀리의 축력에 영향을 받으며, 중동풀리에 설치된 유압실의 압력을 최적으로 제어함으로써 줄일 수 있다. 그러나 전 부하 조건(Full Load Condition)에서의 안전율을 포함하고 있기 때문에 부분부하 조건(Partial Load Condition)에서 기계적인 방법으로 최적의 힘을 가할 수 없다. 따라서 엔진-토크 맵(Map)을 이용한 전자제어만이 풀리의 축력을 최적으로 제어할 수 있고 벨트의 구동손실을 최소화할 수 있다.

동력을 전달할 때 벨트에 발생하는 손실은 Fig.9에서 보는바와 같이 각각으로 분리하여 고려할 수 있다.

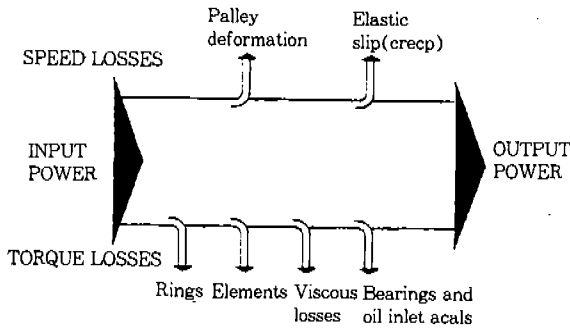


Fig.9 Power Loss of Belt

3.3 Belt 효율

1) 벨트-풀리 미끄럼 손실 (Slip Loss)

벨트의 크리프(Creep : 벨트와 풀리사이의 국부적인 상대운동)는 블록과 풀리와의 접촉으로 인한 블록의 탄성에 의해 발생하는 현상으로, 벨트 감긴 각(Wrap Angle) 내에서 압축력이 발생하여 결과적으로 블록의 접선 방향의 운동이 발생하게 되어 속도손실(Velocity Loss)이 발생하게 된다.

부하조건하에서 블록과 풀리의 탄성변형(Elastic Deformation)으로 이룬적인 원형의 벨트 트랙을 벗어나게 되며, 이러한 현상은 고무 V-벨트에서 알려진 나선효과(Spiral Effect)와도 유사하다. 이러한 현상으로 인해 효과적인 벨트비 반경이나 마찰 하에서 반경방향의 벨트운동을 일으킬 수 있게 된다. 풀리변형은 전달토크와 비교적 무관한 것으로 볼 수 있으나, 풀리 설계 시에는 나선효과(Spiral Effect)를 고려하여 설계해야 한다.

나선트랙(Spiral Track)을 따라 운전되는 벨트에 있어서 동력손실은 벨트풀리의 마찰력의 반경방향에 분력의 결과로 볼 수 있다.

2) 링 조합체의 손실

벨트는 구조상으로 보면, 블록의 피치라인(Pitch Line 또는 Rocking Edge)이 내부 링

과 맞닿는 부위인 블록의 안장부(Saddle)와 일정한 거리를 두고 형성되어 있기 때문에, 링 조합체가 회전할 때는 상대속도가 발생한다. 마찰력의 차이로 링이 블록 안장부(Saddle)위를 미끄러지게 되며, 벨트비가 최소 또는 최대에 가까워질수록 상대속도가 증가하여 링의 상대운동이 최대가 된다.

링의 상대운동과 마찰력으로 인한 손실은 완전히 제거할 수는 없지만,

- * 블록의 피치라인(Pitch Line 또는 Rocking Edge)과 안장부(Saddle)와의 거리를 줄이거나,
- * 링 조합체와 블록 안장부와의 유효마찰계수를 줄이거나
- * 링과 링 사이의 유효마찰계수를 줄이거나
- * 풀리에 작용하는 축력을 최적으로 제어함으로써 줄일 수 있다.

3) 블록의 마찰 손실(Friction Loss)

블록의 피치라인은 어떤 일정한 각도 내에서 인접한 블록의 상대회전운동을 하도록 보장해주고 있다. 벨트가 운동반경을 따라 회전할 때 블록 사이의 미끄럼운동으로 인해 마모(Wear)가 발생하며 따라서 동력손실이 발생한다.

이러한 손실은 최소화시키기 위해서는

- * 블록들 사이의 마찰계수를 줄이고
- * 블록의 피치라인 반경을 접촉응력 측면에서 최적화하고,
- * 블록 두께를 줄이므로써

블록의 마찰손실을 최소화 할 수 있다.

블록 두께가 줄어들면, 블록 사이의 미끄럼운동은 적게되지만, 블록 사이에 존재하는 미는 힘(Push Force)에 의한 블록들 사이의 마찰로 동력손실은 발생하게 된다.

4) 블록의 동적 손실(Dynamic Loss)

풀리에 대한 벨트의 순간위치에 따라 블록의 에너지 상태가 결정되며, 벨트의 회전운

동(Rotation)과 병진운동(Translation)에 따라 발생하는 동적인 손실은

- * 블록 관성의 감소
- * 블록 중량의 감소
- * 블록 구조의 최적화
- * 블록 무게중심의 최적화

등을 통하여 어느 정도 줄일 수 있다.

5) 윤활에 따른 점성 손실(Viscous Loss)

오일은 윤활과 냉각을 목적으로 제공되지만, 이 오일유동으로 인하여 동력손실이 발생된다. 대체로 이 손실은 벨트속도와 오일유동(Oil Flow)과 관련이 있지만 위에서 언급한 다른 손실에 비해 무시할 만큼 작다.

이상에서와 같이 벨트의 효율은 벨트 그 자체뿐만 아니라 폴리에 의해서도 영향을 받으며, 벨트의 횡방향 및 접선방향의 강성이 매우 크기 때문에 미끄럼으로 인한 동력손실은 매우 적다고 할 수 있다.

3.4 Belt의 최적화 설계

Fig.10은 벨트의 최적화 설계 예를 보여주고 있다. 왼쪽은 기존의 벨트를 나타내고 있고 오른쪽은 효율향상을 위해 개선된 벨트의 블록을 보여주고 있다. Table 1은 개선된 벨트의 항목별 수정 내용을 보여 주고 있다.

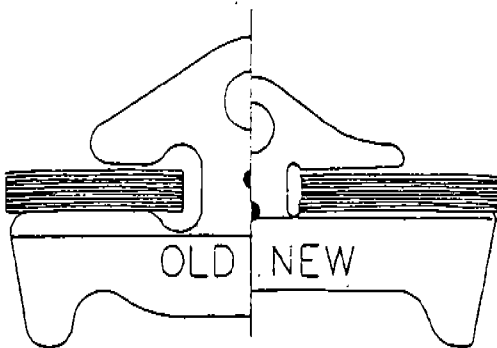


Fig.10 Block Optimization Design

4. 벨트의 적용범위

4.1 벨트의 부하

벨트의 부하는 토크, 스피드 및 벨트비에 의해 결정되며, CVT에 적용하기 위해서는 이것이 탑재되는 차량 및 엔진특성과 잘 매칭 되어야 한다. 즉 벨트는 엔진토크를 전달하기 위해서 상당한 인장강도를 지녀야 하며, 엔진회전수에 따른 원심하중에 충분히 견뎌야 할뿐만 아니라, 최대-최소 벨트비에 대한 굽힘 하중에 대해서도 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

벨트는 차량수명기간 동안 내구성이 보장되어야 하는데, 이것은 주로 링(Ring)의 피로수명과 직접적으로 관련이 있다. 이러한 링의 응력값을 설정된 허용값 이하로 유지하도록 설계하는 것이 바람직하다.

4.2 벨트의 적용범위

VDT社의 벨트 규격은 블록 폭에 따라 크게 24mm, 30mm 벨트 두 종류로 나누며, 적용토크에 따라 피로수명에 대응하기 위해서 링의 수를 늘리므로써 대응할 수 있다. 그러나 벨트의 효율은 링의 수가 적을수록 높일 수 있다.

Table 1 Optimization Items of Belt

No.	Items	Alteration
1	Number of Ring	Reduced
2	Ring Width	Increased
3	Pillar Width	Reduced to Allow Ring Width Increase
4	Element Inertia	Reduced by Decreased Block Height
5	Rocking Edge Position	Moved toward Saddle
6	Center Gravity	Moved Downward

Table 2 Torque Range of Metal Push Belt

CVT design parameter	CVT power capacity class			
	20~90kW max.6500rpm		80~150kW max.6500rpm	
Belt design parameter	24mm		30mm	
Belt width (element width)	24mm		30mm	
Number of rings for each set	belt model:	Tmax (Nm)	belt model:	Tmax (Nm)
6	24/6	80		
7				
8				
9	24/9	125	30/9	210
10	24/10	140	30/10	250
11				
12	24/12	165	30/12	300

Table 2는 VDT社의 금속푸시벨트(Metal Push Belt)의 종류별 적용토크 한계를 보여 주고 있다.

벨트의 적용 관점에서 보면, CVT설계는 주로 풀리 사이의 중심 거리(Center Distance), 벨트 길이(Belt Length) 및 블록 폭(Block Width)의 결정으로부터 출발하며, 이러한 항목들이 CVT의 용량결정에 큰 영향을 미친다.

벨트 제조업체인 VDT社에서는, 주어진 토크레벨에 대해서 링의 수를 줄일 수 있으며 이로인한 효율도 개선할 수 있는, 폭이 큰 블록의 벨트를 추천하고 있으나 CVT의 전장이 그 만큼 증가하는 단점을 내포하고 있다.

5. 맺 음 말

차량의 주행저항에 대응하여 최소-최대 변속비 사이를 연속적으로 무한대의 단계로 변속시킴으로써 우수한 동력성과 연비를 얻을 수 있다는 장점을 지닌 무단변속기의

벨트-풀리 시스템에 대하여, 현재 개발에 성공한 벨트-풀리 시스템의 특징을 분석하고, 벨트 효율 및 적용한계를 조사 분석한 결과, 내구성 및 소음측면에서 볼 때 금속푸시벨트가 가장 유리하며, 벨트의 동력손실을 최소화하기 위하여 금속푸시벨트의 구성부품인 블록과 링을 최적화하고, 풀리에 작용하는 축력을 최적으로 제어함으로써 전달효율이 향상된 벨트-풀리 시스템을 제공할 수 있다.

날로 엄격해지는 배기가스 규제와 전자 및 제어분야의 발달로 성능이 더욱 향상된 무단 변속기의 개발 및 장착이 환산될 것으로 예상되며, 또한 효율, 소음측면 뿐만 아니라, 제작단가가 저렴한 CVT용 벨트의 개발이 잇따를 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

1. Philip G. Gott, "Changing Gears : The Development of the Automotive Transmission", SAE Historical Series, 1991.
2. Sadao Amijima, Toru Fuji, Hiroshi Matuoka, Eiichiro Ikeda, "Study on Axial Force and its Distribution for a Newly Developed Block-Type CVT", JSME Review Vol. 10, No. 3, pp. 22~29, 1989.
3. Sadayuki Hirano, Alan L. Miller & Karl F. Schneider, "SCVT-A State of the Art Electronically Controlled Continuously Variable Transmission", SAE Paper 910410.
4. G. Sch nnenbeck, J. Heinrich, "Continuously Variable Chain Drives for High Torque Application", JSME International Conference on Motion &

Powertransmissions Vol. 1, pp. 405~410, 1991.

5. E. Hendriks, "Qualitative and Quantitative Influence of a Fully Electronically Controlled CVT on Fuel Economy and Vehicle Performance", SAE Paper 930668.

6. E. Hendriks, P. Heegde & T. Prooijen, "Aspects of a Metal Pushing V-Belts for Automotive Cut Application", SAE Paper 881734.

7. 小川 浩, "스チール벨트식 無段變速機의 效率와 壽命", 日本機械學會 講習會 教材 No. 95~64, pp. 15~20, 1995.

8. 김현수, 김광원, "차량용 고무 및 금속 V-벨트 CVT의 변속비-부하토크-축력특성과 성능비교", 자동차공학회지

Vol. 12, No. 3, pp. 9~20, 1990.

9. M. Boos, R. Vorndran, "The CFT 20E Continuously Variable Transmission for Mid-Range Automotive", SAE Paper 945028.

10. 이충섭, 조희복, "승용차용 무단변속기 (CVT) 개발동향", 자동차공학회지 Vol. 17, No. 5, pp. 17~27, 1995.

11. Yasuhito Sakai, "The ECVT-Electro Continuously Variable Transmission", SAE Paper 880481.

12. 兩角岳彦, "Continuously Variable Transmission", Motor Fan, 1992年 6 月號, pp. 81~96.

13. 兩角岳彦, "自動車のテクノロジー2", Motor Fan 別冊, pp. 191~206, 1992.